

EDN: WNWEKG

УДК 542.97:547.915:662.75:665.11:54–44

## Hydrodeoxygenation of Oleic Acid on Supported Platinum Catalysts Based on Mixed MgAl Oxides

Aleksandr A. Nepomniashchii\*, Ludmila A. Buluchevskaya,  
Evgeniy A. Buluchevskiy and Aleksandr V. Lavrenov  
*Center of New Chemical Technologies BIC  
Boreskov Institute of Catalysis  
Omsk, Russian Federation*

Received 04.10.2024, received in revised form 15.10.2024, accepted 18.11.2024

**Abstract.** The catalytic hydrodeoxygenation of oleic acid over Pt supported on mixed magnesium and aluminum oxides with Mg<sup>2+</sup>/Al<sup>3+</sup> ratio 1, 2, 3 and 4 was studied. 100 % feed conversion and heptadecane obtaining as the main products of decarbonylation/decarboxylation reactions was demonstrated. The formation of stearic acid esters in side reactions due to the high basicity of the catalysts was shown.

**Keywords:** hydrodeoxygenation, oleic acid, layered hydroxides, mixed oxides, platinum catalysts.

**Acknowledgements.** This research was funded by Russian Science Foundation, Grant No. 24–23–20109, <https://rscf.ru/en/project/24–23–20109/>, and a grant in the form of a subsidy provided from the budget of the Omsk region.

The authors are grateful to E. N. Kudrya, I. V. Muromtsev, N. V. Kornienko, T. I. Gulyaeva and A. V. Vasilevich for the analysis of the catalyst samples and the composition of liquid products. This study was carried out using the facilities of the shared research center, the “National Center of Investigation of Catalysts” at the Boreskov Institute of Catalysis and the Omsk Regional Center for Collective Use of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Citation: Nepomniashchii A. A., Buluchevskaya L. A., Buluchevskiy E. A., Lavrenov A. V. Hydrodeoxygenation of oleic acid on supported platinum catalysts based on mixed MgAl oxides. *J. Sib. Fed. Univ. Chem.*, 2024, 17(4), 587–595. EDN: WNWEKG



# Гидродеоксигенация олеиновой кислоты на нанесенных платиновых катализаторах на основе смешанных MgAl-оксидов

А. А. Непомнящий, Л. А. Булучевская,  
Е. А. Булучевский, А. В. Лавренов  
*Центр новых химических технологий ИК СО РАН  
Институт катализа СО РАН  
Российская Федерация, Омск*

---

**Аннотация.** Исследован процесс гидродеоксигенации олеиновой кислоты на нанесенных платиновых катализаторах на основе смешанных оксидов магния и алюминия, полученных термической обработкой слоистых двойных гидроксидов с соотношением  $Mg^{2+}/Al^{3+}$ , равным 1, 2, 3 и 4. Показано, что независимо от состава носителя исследованные образцы обеспечивают полное превращение олеиновой кислоты, а основным продуктом превращения является гептадекан, образующийся по реакциям декарбонилирования/декарбоксации. Высокая основность катализаторов способствует протеканию побочных реакций, приводящих к образованию сложных эфиров стеариновой кислоты.

**Ключевые слова:** гидродеоксигенация, олеиновая кислота, слоистые гидроксиды, смешанные оксиды, платиновые катализаторы.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24–23–20109, [https://rscf.ru/project/24–23–20109/](https://rscf.ru/project/24-23-20109/), а также гранта в форме субсидии, предоставленной из бюджета Омской области.

Авторы выражают благодарность инженеру Е. Н. Кудря, м.н.с. И. В. Муромцеву, м.н.с. Н. В. Корниенко, м.н.с. Т. И. Гуляевой и н.с. А. В. Василевич за выполнение работ по исследованию катализаторов и состава жидких продуктов.

Физико-химические исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования «Национальный центр исследования катализаторов» Института катализа СО РАН.

---

Цитирование: Непомнящий А. А., Булучевская Л. А., Булучевский Е. А., Лавренов А. В. Гидродеоксигенация олеиновой кислоты на нанесенных платиновых катализаторах на основе смешанных MgAl-оксидов. Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2024, 17(4). С. 587–595. EDN: WNWEKG

---

## Введение

Биодизельные топлива второго поколения, получаемые путем гидропереработки масложирового сырья [1–3], значительно превосходят по своим эксплуатационным и экологическим характеристикам нефтяные дизельные топлива, а также биодизельные топлива первого поколения – метиловые эфиры жирных кислот [4, 5].

Реакции гидродеоксигенации жирных кислот могут протекать по нескольким маршрутам [6–8]. Жирная кислота может элиминировать карбоксильную группу в виде углекислого газа (декарбоксилирование,  $\text{deCO}_2$ ) с образованием углеводорода с числом С-атомов на один меньше, чем в исходной кислоте, либо восстанавливаться до альдегида. Альдегид, в свою очередь, может элиминировать карбонильную группу в виде СО (декарбонилирование,  $\text{deCO}$ ) либо восстанавливаться до соответствующего спирта с последующей дегидратацией и гидрированием образующегося алкена до алкана с такой же длиной углеводородной цепи, как в исходной кислоте. Таким образом, реализуется путь прямой гидродеоксигенации (HDO). Процесс может сопровождаться гидрокрекингом образующихся алканов, а также каталитическими превращениями оксидов углерода – метанированием и реакцией водяного газа. Соотношение скоростей реакций HDO и  $\text{deCO}_x$  определяется прежде всего природой катализатора. Показано [9], что на нанесенных монометаллических катализаторах на основе благородных металлов процесс протекает преимущественно по направлению декарбоксилирования/декарбонилирования.

В качестве катализаторов гидродеоксигенации жирных кислот или их триглицеридов исследованы монометаллические (Pt, Pd, Re, Rh, Ru, Ni, Mo) или биметаллические (Ni(Co) Mo(W)S(O)) катализаторы, нанесенные на оксидные носители ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ) [10, 11], цеолиты (USY, HZSM-5, ZSM-23) [12, 13], мезопористые молекулярные сита (MCM-41, AlSBA-15) [14] или углеродные материалы [15]. Показана [16] принципиальная возможность гидродеоксигенации масложирового сырья на катализаторах с носителем основной природы – двойных магний-алюминиевых гидроксидах, полученных из гидротальцитов. Гидротальциты представляют собой слоистые двойные гидроксиды (СДГ) двух- и трехвалентных катионов ( $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Al}^{3+}$ ) с заменяемым анионом ( $\text{CO}_3^{2-}$  и/или  $\text{OH}^-$ ) и молекулами воды в межслоевом пространстве. Путем контролируемого термического разложения СДГ могут быть преобразованы в смешанные оксиды с малым размером кристаллов и высокой удельной поверхностью.

Целью настоящей работы являлось изучение направлений гидродеоксигенации олеиновой кислоты в присутствии платиновых катализаторов, нанесенных на двойные Mg/Al-оксиды.

### Экспериментальная часть

Синтез СДГ с соотношением  $\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+} = 1, 2, 3$  и 4 проводили методом соосаждения из водных растворов  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  и  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  [17] с последующим старением и сушкой. Полученные СДГ обозначали как MgAl- $y$ , где  $y$  – молярное соотношение Mg/Al. Смешанные оксиды  $\text{MgAlO}_x$ - $y$  ( $y$  – Mg/Al) были получены путем прокаливания MgAl- $y$  при 600 °С. Платиновые катализаторы (3 мас.% Pt) готовили методом пропитки по влагоемкости раствором платиноклористоводородной кислоты с последующей сушкой (120 °С) и прокаливанием (500 °С). Перед началом испытаний катализаторы активировали в токе  $\text{H}_2$  при 500 °С в течение 1 ч.

Химический состав носителей определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП) на приборе 710-ES («Varian»). Термический анализ СДГ проводили в области температур 20–650 °С на приборе STA-449C Jupiter («Netzsch», Германия). Фазовый состав носителей исследовали методом порошковой рентгеновской дифракции. Температурно-программируемое восстановление (ТПВ) проводили на хемосорбционном анализаторе AutoChem II 2920 («Micromeritics») с детектором по теплопроводности в температурной области 35–500 °С со скоростью нагрева измерительной ячейки с образцом 10 °С/

мин с использованием калибровочной смеси 10 об.%  $\text{H}_2$  в аргоне. Определение дисперсности металлов осуществляли методом импульсной хемосорбции CO для предварительно восстановленных образцов.

Гидродеоксигенацию олеиновой кислоты проводили в автоклаве при начальном давлении водорода 4,0 МПа и температуре 350 °С, в качестве растворителя использовали н-декан. Продукты процесса анализировали методом ГЖХ. Методики синтеза образцов, физико-химических исследований, а также испытаний катализатора подробно описаны в дополнительных материалах.

## Результаты и их обсуждение

### *Состав и физико-химические характеристики носителей и катализаторов*

На дифрактограммах образцов  $\text{MgAl-}\gamma$  (рис. 1а) присутствуют характерные рефлексы  $\text{MgAl-СДГ}$  с формулой  $\text{Mg}_6\text{Al}_3(\text{OH})_6\text{CO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  при  $2\theta = 11,4, 22, 35, 60,8$  и  $61,8^\circ$ , соответствующие отражениям (003), (006), (009), (110) и (113). С увеличением доли магния рефлексы  $d_{003}$ ,  $d_{006}$  и  $d_{110}$  сдвигаются в сторону меньших углов, что может быть связано с уменьшением электростатического взаимодействия между положительно заряженными бруситоподобными слоями и межслоевыми анионами [18]. Уширение рефлексов  $d_{003}$ ,  $d_{006}$ ,  $d_{110}$  и  $d_{113}$  с ростом содержания магния также описано в литературе [18] и свидетельствует об уменьшении размеров кристаллитов  $\text{MgAl-СДГ}$ . На дифрактограмме образца с наименьшим соотношением  $\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$  также присутствуют рефлексы, характерные для гиббсита, что свидетельствует о примеси в образце гидроксида алюминия. Химический состав образцов приведен в табл. S1 дополнительных материалов.

Все дифрактограммы прокаленных образцов  $\text{MgAl-СДГ}$  (рис. 1б) содержат характерные дифракционные рефлексы фазы периклаза  $\text{MgO}$  при  $2\theta = 44^\circ$  и  $63^\circ$ . Для образцов с молярным

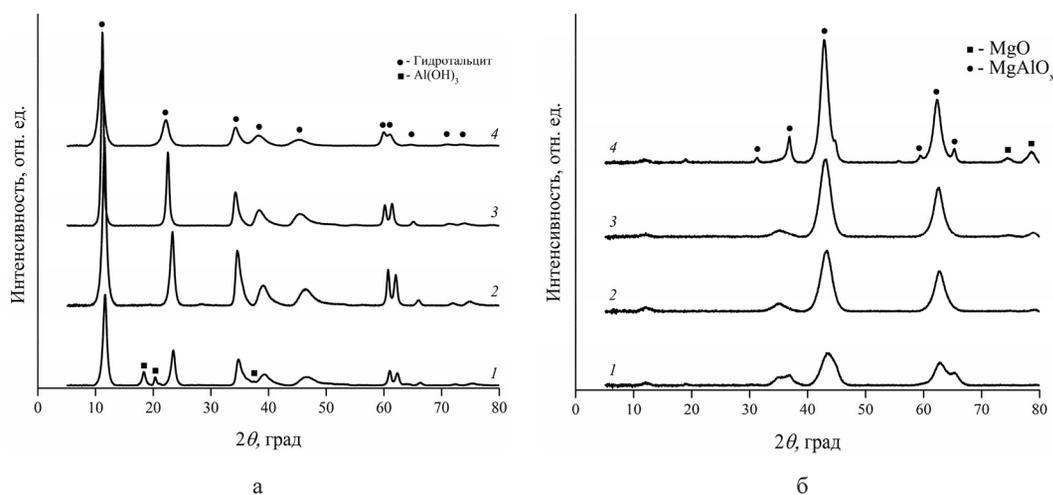


Рис. 1 Дифрактограммы свежеприготовленных образцов  $\text{MgAl-}\gamma$  (а) и прокаленных при температуре 600 °С  $\text{MgAlO}_x\text{-}\gamma$  (б) с соотношением  $\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$ : 0.93 (1), 1.75 (2), 2.95 (3) и 4.22 (4)

Fig. 1. XRD patterns of fresh-prepared samples  $\text{MgAl-}\gamma$  (a) and  $\text{MgAlO}_x\text{-}\gamma$  samples calcined at 600 °C (b) with the  $\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$  ratio: 0.93 (1), 1.75 (2), 2.95 (3) and 4.22 (4)

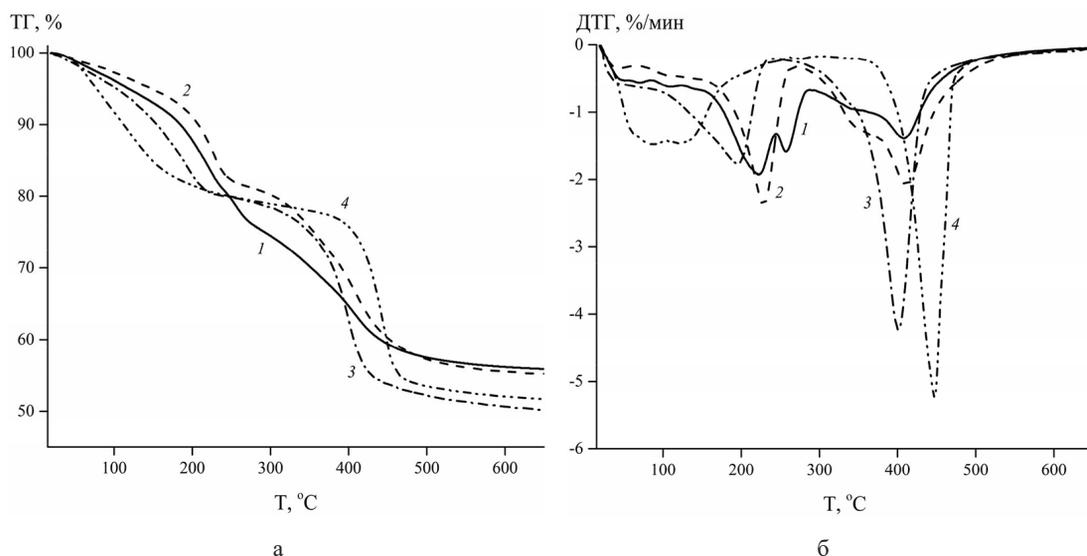


Рис. 2 ТГ- (а) и ДТГ- (б), полученные для синтезированных слоистых двойных гидроксидов  $MgAl-y$  с соотношением  $Mg^{2+}/Al^{3+}$ : 0.93 (1), 1.75 (2), 2.95 (3) и 4.22 (4)

Fig. 2 TG- (a) and DTG-curves (б) obtained for the synthesized layered double hydroxides  $MgAl-y$  with the  $Mg^{2+}/Al^{3+}$  ratio: 0.93 (1), 1.75 (2), 2.95 (3) and 4.22 (4)

отношением  $Mg/Al$  выше 1 присутствуют также рефлексы шпинельной фазы  $MgAl_2O_4$  при  $2\theta = 32^\circ, 37^\circ, 45^\circ$  и  $65^\circ$ . Дифракционные пики, относящиеся к алюмооксидным фазам, обнаружены не были.

На рис. 2 приведены кривые ТГ и ДТГ приготовленных гидротальцитов с молярным соотношением  $Mg^{2+}/Al^{3+}$ , равным 1–4 от 20 до 650 °С. Потеря массы до 230 °С обусловлена удалением физически адсорбированной и межслоевой воды, что в общей сложности составляет 19,3–19,8 мас.% для образцов с молярным соотношением  $Mg^{2+}/Al^{3+}$ , равным 1–3 и 21,1 мас.% для образца с соотношением 4. Основное разложение СДГ происходит в температурном диапазоне 230–570 °С. Изменение массы в этом температурном диапазоне обусловлено потерей кристаллогидратной воды и декарбонизацией, а также дегидроксилированием слоев с последующим разрушением слоистой структуры при высокой температуре. На ДТГ-кривой образца с молярным соотношением  $Mg^{2+}/Al^{3+}$ , равным 1, присутствует дополнительный пик потери массы при 270 °С, сопровождаемый эндотермическим эффектом (рис. S3 дополнительных материалов) и обусловленный дегидратацией гидроксида алюминия. Выше 570 °С изменения массы образцов не наблюдаются.

Профили ТПВ катализаторов (рис. 4.) включают две области поглощения водорода: низкотемпературную в диапазоне 150–300 °С и высокотемпературную при 300–420 °С. Низкотемпературная область соответствует восстановлению слабосвязанных с поверхностью носителя частиц  $PtO_2$  до металлического состояния, высокотемпературная – восстановлению более прочно закрепленных оксидов платины на границе раздела металл-носитель. Увеличение доли низкотемпературного пика и смещение максимума поглощения в область более низких температур с увеличением соотношения  $Mg^{2+}/Al^{3+}$  в образце указывает на преимущественное взаимодействие  $Pt$  с соединениями  $Mg$ , что улучшает ее восстанавливаемость [19]. Значение

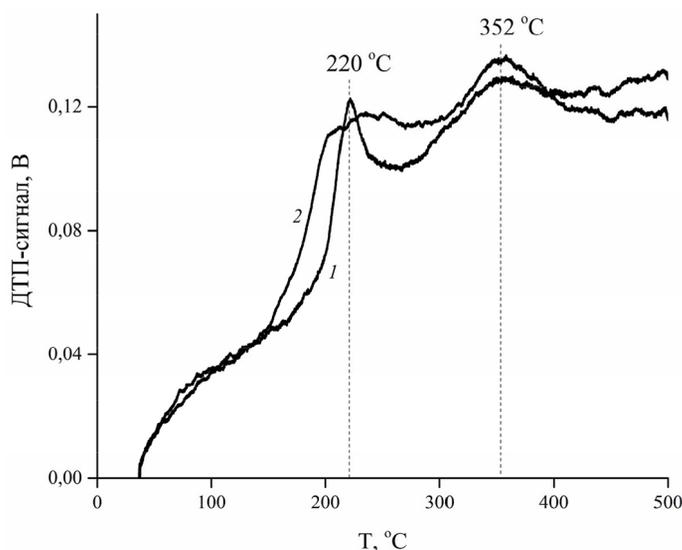


Рис. 4. Профили температурно-программируемого восстановления для  $3\text{Pt}/\text{MgAlO}_x\text{-y}$  катализаторов с соотношением  $\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$ : 0.93 (1) и 2.95 (2)

Fig. 4. TPR profiles for  $3\text{Pt}/\text{MgAlO}_x\text{-y}$  catalysts with  $\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$  ratio: 0.93 (1) and 2.95 (2)

дисперсности платины в восстановленных катализаторах не зависит от соотношения  $\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$  в образцах и составляет 28 %.

#### *Гидродеоксигенация олеиновой кислоты*

Анализ продуктов гидродеоксигенации олеиновой кислоты при температуре 350 °С и начальном давлении водорода 4 МПа показал, что к моменту нагрева реакционной смеси до заданной температуры процесса на всех образцах катализаторов происходит полное гидрирование двойных связей в олеиновой кислоте с образованием стеариновой кислоты, содержание которой в продуктовой смеси к этому времени (за вычетом растворителя – декана) составляет 27–32 мас.% (рис. S5 дополнительных материалов). Все исследуемые образцы обеспечивают близкие скорости превращения стеариновой кислоты. В продуктах процесса обнаружены кислородсодержащие соединения – промежуточные продукты превращения стеариновой кислоты, и продукты ее полного гидрирования – нормальные алканы.

Промежуточные продукты гидродеоксигенации стеариновой кислоты представлены тремя соединениями – октадеканолом, а также метиловым и октадециловым эфирами стеариновой кислоты (табл. 2). Таким образом, на первой стадии процесса, по крайней мере, часть стеариновой кислоты гидрируется до октадеканола на металлических центрах катализатора. Образующийся октадеканол вступает в реакцию этерификации с непрореагировавшей стеариновой кислотой, катализируемую основаниями. Аналогичные сложные эфиры жирных кислот и жирных спиртов были обнаружены в продуктах гидродеоксигенации и другими исследователями, например [20, 21], однако катализаторы этих процессов имели кислотную природу. Образование метилстеарата, по-видимому, происходит в результате разрыва  $\text{-C-C}$  связи первого атома спиртовой части молекулы стеарилстеарата, в результате которой образуется

Таблица 2. Состав жидких продуктов (мас.%) в реакции гидродеоксигенации олеиновой кислоты на катализаторах 3Pt/MgAlO<sub>x</sub>-y<sup>a</sup>Table 2. Composition of oleic acid hydrodeoxygenation liquid products (wt.%) on 3Pt/MgAlO<sub>x</sub>-y<sup>a</sup> catalysts

Содержание, мас.%	3Pt/MgAlO <sub>x</sub> -1	3Pt/MgAlO <sub>x</sub> -2	3Pt/MgAlO <sub>x</sub> -3	3Pt/MgAlO <sub>x</sub> -4
Стеариновая кислота	1.6	7.9	4.1	1.3
Октадеканол	4.8	5.9	2.4	2.0
Метилстеарат	2.6	1.7	0.2	0.2
Углеводороды C <sub>5</sub> -C <sub>14</sub>	18.0	8.9	9.5	5.8
Углеводороды C <sub>15</sub> -C <sub>18</sub>	64.1	73.5	74.3	79.3
Стеарилстеарат	7.6	1.1	1.5	7.0
Соотношение C <sub>17</sub> /C <sub>18</sub>	5.0	7.1	8.0	10.6

<sup>a</sup> Условия реакции: температура 350 °С, давление 4 МПа, продолжительность 5 ч, масса катализатора 0,50 г, масса олеиновой кислоты 2,5 г, растворитель – н-декан (60,0 г).

н-гептадекан – углеводород с числом атомов углерода на один меньшим, чем в исходном спирте. Механизм этого процесса до конца не ясен, однако аналогичные ему реакции разрыва C–C связи в глицерольных остатках при гидродеоксигенации триглицеридов жирных кислот описаны в литературе [22]. При этом реакции дегидратации/гидрирования жирных спиртов, активно протекающие на катализаторах с кислотными носителями [23, 24], на исследуемых образцах идут в незначительной степени – соотношение выходов C<sub>17</sub> и C<sub>18</sub>-углеводородов в продуктах находится в пределах 5–10, тогда как, например, на катализаторах Pt/WO<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> этот показатель не превышает 0,4.

В составе газообразных продуктов гидродеоксигенации обнаружены моно- и диоксид углерода, метан, а также углеводородные газы C<sub>2</sub>–C<sub>4</sub> (табл. S3 дополнительных материалов). Образование оксидов углерода указывает на протекание реакций декарбоксилирования/декарбонилирования, которые, так же как и распад стеарилстеарата, приводят к образованию углеводородов с нечетным числом атомов углерода.

Образующиеся в результате гидродеоксигенации октадекан и гептадекан подвергаются дальнейшим превращениям в реакциях гидрокрекинга с образованием углеводородов C<sub>5</sub>–C<sub>14</sub>, а также углеводородных газов. В наибольшей степени реакции гидрокрекинга протекают на образце с мольным соотношением Mg<sup>2+</sup>/Al<sup>3+</sup>, равным 1.

Подтверждение образования C<sub>17</sub> и C<sub>18</sub> углеводородов и кислородсодержащих соединений было получено с помощью ЯМР <sup>1</sup>H и <sup>13</sup>C и ГХ–МС.

### Заключение

В результате исследования гидродеоксигенации олеиновой кислоты на катализаторах на основе платины, нанесенной на смешанные оксиды алюминия и магния, полученные в результате термической обработки слоистых MgAl-гидроксидов с различным соотношением Mg<sup>2+</sup>/Al<sup>3+</sup>, установлено, что, независимо от данного соотношения, основными путями образования углеводородов являются декарбоксилирование/декарбонилирование. При этом протекает побочная реакция этерификации стеариновой кислоты октадеканолом с последующим распа-

дом сложного эфира и образованием гептадекана. Реакции дегидратации/гидрирования жирных спиртов на исследуемых основных образцах протекают в гораздо меньшей степени, чем на катализаторах кислотной природы, что обуславливает более низкий выход углеводородов с четным числом атомов углерода.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Дополнительные материалы



### Список литературы / References

- [1] Mittelbach M. Fuels from oils and fats: recent developments and perspectives. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2015. 117(11), 1832–1846.
- [2] Othman M.F., Adam A., Najafi G., Mamat R. Green fuel as alternative fuel for diesel engine: A review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2017. 80(May), 694–709.
- [3] Galadima A., Muraza O. Catalytic upgrading of vegetable oils into jet fuels range hydrocarbons using heterogeneous catalysts: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015. 29, 12–23.
- [4] Bezergianni S., Dimitriadis A. Comparison between different types of renewable diesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. 21 (C), 110–116.
- [5] Chen S., Zhou G., Miao C. Green and renewable bio-diesel produce from oil hydrodeoxygenation: Strategies for catalyst development and mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019. 101, 568–589.
- [6] Donnis B., Egeberg R. G., Blom P., Knudsen K. G. Hydroprocessing of bio-oils and oxygenates to hydrocarbons understanding the reaction. *Topics in Catalysis*, 2009. 52(3), 229–240.
- [7] Hermida L., Abdullah A. Z., Mohamed A. R. Deoxygenation of fatty acid to produce diesel-like hydrocarbons: A review of process conditions, reaction kinetics and mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015. 42, 1223–1233.
- [8] Ruinart De Brimont M., Dupont C., Daudin A., Geantet C., Raybaud P. Deoxygenation mechanisms on Ni-promoted MoS<sub>2</sub> bulk catalysts: A combined experimental and theoretical study. *Journal of Catalysis*, 2012. 286, 153–164.
- [9] Kim S.K., Han J. Y., Lee H., Yum T., Kim Y., Kim J. Production of renewable diesel via catalytic deoxygenation of natural triglycerides: Comprehensive understanding of reaction intermediates and hydrocarbons. *Applied Energy*, 2014. 116(C), 199–205.
- [10] Breyse M., Afanasiev P., Geantet C., Vrinat M. Overview of support effects in hydrotreating catalysts. *Catalysis Today*, 2003. 86(1–4), 5–16.
- [11] Murali Dhar G., Srinivas B. N., Rana M. S., Kumar M., Maity S. K. Mixed oxide supported hydrodesulfurization catalysts – a review. *Catalysis Today*, 2003. 86(1–4), 45–60.

- [12] Chen L., Li H., Fu J., Miao C., Lv P., Yuan Z. Catalytic hydroprocessing of fatty acid methyl esters to renewable alkane fuels over Ni/HZSM-5 catalyst. *Catalysis Today*, 2016. 259, 266–276.
- [13] Nepomnyashchii A.A., Saibulina E.R., Buluchevskiy E.A., Gulyaeva T.I., Yurpalov V.L., Mironenko R.M., Potapenko O.V., Lavrenov A.V. Combined Deoxygenation and Isomerization of Sunflower Oil Fatty Acid Triglycerides on Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Zeolite Catalysts. *Catalysis in Industry*, 2024. 16(2), 170–177.
- [14] Al Alwan B., Salley S. O., Ng K. Y.S. Biofuels production from hydrothermal decarboxylation of oleic acid and soybean oil over Ni-based transition metal carbides supported on Al-SBA-15. *Applied Catalysis A: General*, 2015. 498, 32–40.
- [15] Lu M., Lu F., Zhu J., Li M., Zhu J., Shan Y. Hydrodeoxygenation of methyl stearate as a model compound over Mo<sub>2</sub>C supported on mesoporous carbon. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 2015. 115(1), 251–262.
- [16] Patil S. J., Vaidya P.D. On the production of bio-hydrogenated diesel over hydrotalcite-like supported palladium and ruthenium catalysts. *Fuel Processing Technology*, 2018. 169, 142–149.
- [17] Belskaya O.B., Stepanova L.N., Leontyeva N.N., Kazakov M.O., Gulyaeva T.I., Cherepanova S. V., Lavrenov A. V., Likholobov V. A. Formation of Platinum Centers in Basic Carriers of Layered Double Hydroxide Type. *Chemistry for Sustainable Development*, 2013. 21(1), 29–38.
- [18] Saleh T.S., Narasimharao K., Ahmed N.S., Basahel S.N., Al-Thabaiti S.A., Mokhtar M. Mg-Al Hydrotalcite as an Efficient Catalyst for Microwave Assisted Regioselective 1,3-Dipolar Cycloaddition of Nitrilimines with the Enaminone Derivatives: A Green Protocol. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2013. 367, 12–22.
- [19] Barroso-Martín I., Benmebirouk-Pareja N., Montaña M., Cecilia J. A., Infantes-Molina A., Rodríguez-Castellón E. Ruthenium incorporation into hydrotalcites-derived mixed oxides for phenol hydrogenation: Role of Mg/Al molar ratio. *Catalysis Today*, 2023. 423(15), 114274.
- [20] Peng B., Zhao, C., Kasakov, S., Foraita, S., Lercher, J. A. Manipulating Catalytic Pathways: Deoxygenation of Palmitic Acid on Multifunctional Catalysts. *Chemistry – A European Journal*, 2013. 19(15), 4732–4741.
- [21] Žula M., Grilc M., Likozar B. Hydrocracking, hydrogenation and hydro-deoxygenation of fatty acids, esters and glycerides: Mechanisms, kinetics and transport phenomena. *Chemical Engineering Journal*, 2022. 444(5), 136564.
- [22] Kim S.K., Han J.Y., Lee H., Yum T., Kim Y., Kim J. Production of renewable diesel via catalytic deoxygenation of natural triglycerides: Comprehensive understanding of reaction intermediates and hydrocarbons. *Applied Energy*, 2014. 116, 199–205.
- [23] Janampelli S., Darbha S. Metal Oxide-Promoted Hydrodeoxygenation Activity of Platinum in Pt-MO<sub>x</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts for Green Diesel Production. *Energy & Fuels*, 2018. 32(12), 12630–12643.
- [24] Nepomnyashchii A.A., Yurpalov V.L., Buluchevskiy E.A., Drozdov V.A., Gulyaeva T.I., Mironenko R.M., Lavrenov A. V. Hydrodeoxygenation of Sunflower Oil on Pt/WO<sub>x</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst. *Catalysis in Industry*, 2024. 16(2), 187–195.