

## ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ГИДРИРОВАНИЕ CO<sub>2</sub> НА КАТАЛИЗАТОРЕ, СОДЕРЖАЩЕМ ЖЕЛЕЗО НА УГЛЕРОДНОМ НОСИТЕЛЕ

**Д.В. Васькова** — Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, Москва, Россия; Отделение Институт фотонных технологий, Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия. Эл. почта: darinavaskova@mail.ru

**А.Е. Коклин** — Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, Москва, Россия; Отделение Институт фотонных технологий, Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия. ORCID: 0000-0002-1304-2408. Эл. почта: koklin@ioc.ac.ru

**Т.В. Богдан** — Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, Москва, Россия; Отделение Институт фотонных технологий, Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия. ORCID: 0000-0002-1078-1141. Эл. почта: chemist2014@yandex.ru

**Н.В. Минаев** — Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, Москва, Россия; Отделение Институт фотонных технологий, Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия. ORCID: 0000-0002-9931-0118. Эл. почта: minaevn@gmail.com

**В.И. Богдан** — Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, Москва, Россия; Отделение Институт фотонных технологий, Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия. ORCID: 0000-0001-9716-1748. Эл. почта: vibogdan@gmail.com  
(для переписки)

© 2025 г. Поступила в редакцию 28.10.2025 г. Прошла рецензирование 02.12.2025 г.  
Принята к публикации 02.12.2025 г.

Изучены закономерности гидрирования диоксида углерода на Fe-содержащем катализаторе, нанесенном на углеродный носитель в диапазоне температур 250–400 °С при давлении 0,1 и 8,5 МПа. При гидрировании CO<sub>2</sub> при 0,1 МПа образуется только СО. При 8,5 МПа происходит более глубокое гидрирование CO<sub>2</sub> с образованием углеводородов (величина коэффициента роста цепи  $\alpha = 0,54–0,65$ ), селективность образования которых повышается с ростом температуры. Наилучшие показатели по образованию углеводородов получены при 8,5 МПа и 400 °С; при этом соотношение олефины/алканы в C<sub>2</sub>–C<sub>4</sub> углеводородах достигает величины 1,6.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** диоксид углерода, гидрирование, углеводороды, олефины, восстановление CO<sub>2</sub>, железосодержащий катализатор, калий, синтез Фишера–Тропша.

### ВВЕДЕНИЕ

Существует мнение, что диоксид углерода, как парниковый газ, является причиной повышения средней температуры атмосферы Земли, что провоцирует экологические проблемы и негативно влияет на климат нашей планеты. Предлагаются различные пути решения проблемы: уменьшение выбросов,

улавливание и хранение CO<sub>2</sub>, улавливание и переработка CO<sub>2</sub>. Под переработкой подразумевается вовлечение CO<sub>2</sub> в синтез химических соединений. В настоящее время улавливание и переработка CO<sub>2</sub> считается наиболее перспективным подходом к смягчению последствий увеличения выбросов диоксида углерода. Тем не менее, этот подход по-прежнему сталкивается с техническими и экономическими барьерами, преодоление которых необходимо для эффективной реализации технологии в глобальном масштабе. Молекула CO<sub>2</sub> является термодинамически стабильной, поэтому для ее вовлечения в химическое превращение требуются специальные условия и использование катализаторов.

Гетерогенно-каталитическое гидрирование — один из таких способов вовлечения диоксида углерода в химическое взаимодействие. С помощью катализаторов, содержащих различные активные металлы, можно получить широкий спектр продуктов гидрирования CO<sub>2</sub>, включая метан, муравьиную кислоту, углеводороды и спирты [1, 2]. Особый интерес представляют легкие олефины, являющиеся ценным сырьем для полимерной промышленности.

В настоящее время широко исследуются железосодержащие гетерогенные системы, которые в силу дешевизны и доступности считаются наиболее перспективными в гидрировании CO<sub>2</sub> с образованием углеводородов [1, 3]. Основные продукты — парафины нормального и изостроения; образуются также олефины и небольшие количества кислородсодержащих соединений. Работа является продолжением серии наших работ по каталитической конверсии диоксида углерода в сверхкритическом (СК) состоянии [4–7]. Большинство исследований сосредоточены на оптимизации железосодержащих катализаторов за счет управления их морфологией, кристаллической структурой и адсорбционными свойствами — для этого используют различные носители, варьируют методы синтеза и условия предварительной обработки [8–16]. Добавление промоторов в железосодержащие катализаторы гидрирования диоксида углерода направлено на повышение их активности, селективности и стабильности работы. Щелочные металлы, такие как Na, K, Rb и Cs, подавляют образование метана и повышают селективность образования олефинов (особенно C<sub>2</sub>–C<sub>4</sub>) [1, 2, 17, 18]. Щелочные металлы действуют как электронные промоторы, отдавая электроны атомам железа на поверхности катализатора, что резко изменяет каталитическую активность. Они могут повышать селективность образования легких олефинов, облегчая их десорбцию. Также они могут влиять на дисперсность образующихся активных фаз на основе карбидов железа, что, в свою очередь, сказывается на распределении продуктов в результате реакции. Одновременно может происходить увеличение конверсии CO<sub>2</sub>.

Цель нашей работы — изучение влияния давления и температуры на активность и селективность железо-калиевого катализатора в процессе гидрирования CO<sub>2</sub>, а также оценка влияния температуры предварительной активации катализатора водородом.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

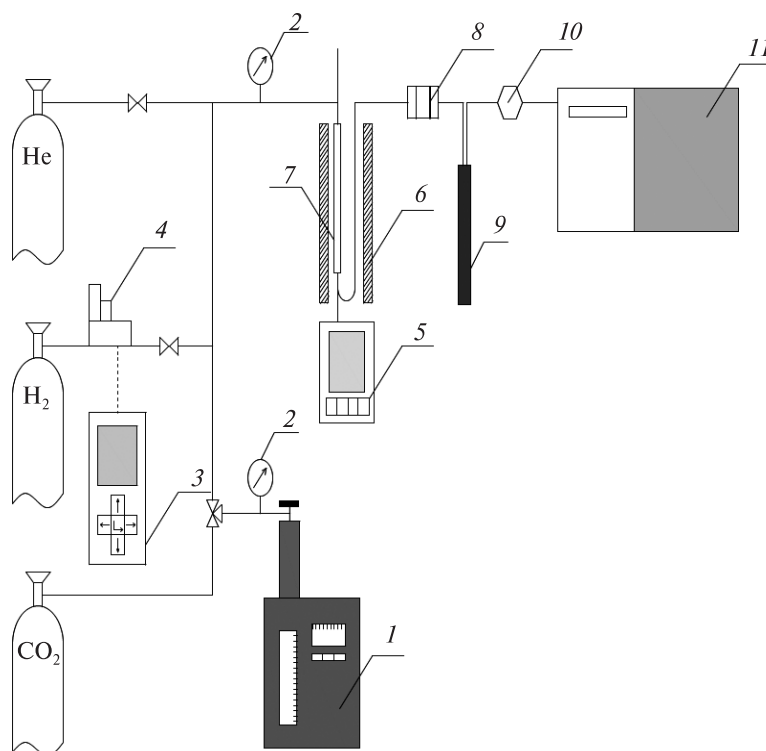
В работе был использован железосодержащий катализатор, промотированный калием, приготовленный методом пропитки носителя по влагоемкости по методике, описанной в работе [7]. В качестве носителя использовали синтетический углеродный материал Сибунит. Предварительно носитель многократно

промывали дистиллированной водой и сушили на воздухе при 80 °С в течение 8 ч. Нанесение металлов проводили трехкратной пропиткой носителя по влагоемкости водным раствором нитратов железа и калия. Между каждой пропиткой выполняли прокалывание образца в токе гелия при 450 °С в течение 4 ч. Содержание железа составляло 20 мас. %, калия — 1 мас. %. Катализатор обозначен FeK/C.

Перед проведением каталитических экспериментов проводили восстановление катализатора непосредственно в реакторе в токе водорода при 250 или 400 °С в течение 2 ч.

Гидрирование CO<sub>2</sub> проводили в U-образном реакторе проточного типа. Эксперименты осуществляли при температурах 250—400 °С и давлениях 0,1 и 8,5 МПа; соотношение CO<sub>2</sub> : H<sub>2</sub> = 1 : 1, общая скорость подачи реагентов составляла 4800 см<sup>3</sup>·ч<sup>-1</sup>·г<sub>кат</sub><sup>-1</sup> (ст.у.). Масса загруженного катализатора составляла 1 г.

Схема лабораторной каталитической установки приведена на рис. 1. Диоксид углерода подавали жидкостным шприцевым насосом высокого давления, водород — с помощью регулятора расхода газа. Давление регулировали мембранным клапаном обратного давления. Анализ продуктов реакции проводили методом газовой хроматографии с использованием хроматографа Хроматэк Кристалл 5000 с насадочной колонкой с сорбентом Рогарак Q (анализ CO, CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub>, длина колонки 3 м, изотерма 50 °С) и капиллярной колонкой



**Рис. 1.** Схема лабораторной каталитической установки: 1 — насос высокого давления, 2 — манометр, 3, 4 — блок управления и регулятор расхода газа, 5 — терморегулятор, 6 — печь, 7 — реактор, 8 — клапан обратного давления, 9 — ловушка, 10 — шестиportовый кран, 11 — газовый хроматограф

Zebron ZB-1 (анализ углеводов, длина колонки 100 м, температура колонки 40 °С 10 мин., далее нагрев со скоростью 10 град/мин до 200 °С). Отбор проб проводили непосредственно в ходе экспериментов. Для идентификации образующихся углеводов использовали хромато-масс-спектрометр Thermo Focus GC—DSQ II (США) с капиллярной колонкой Zebron ZB-1 (100 м).

Конверсия диоксида углерода была рассчитана из данных хроматографического анализа по формуле:

$$K_{\text{CO}_2} = ([\text{CO}_2]_n - [\text{CO}_2]_k) / [\text{CO}_2]_n \cdot 100 \%,$$

где  $[\text{CO}_2]_n$  и  $[\text{CO}_2]_k$  — начальная и конечная концентрации диоксида углерода в исходной смеси и продуктах.

Селективности образования CO и углеводов были рассчитаны по следующим формулам:

$$S_{\text{CO}} = [\text{CO}] / ([\text{CO}] + [\text{C}_x\text{H}_y]) \cdot 100 \%,$$

$$S_{\text{C}_x\text{H}_y} = 100 \% - S_{\text{CO}},$$

где  $[\text{CO}]$  — концентрация монооксида углерода в продуктах реакции. Концентрацию углеводов  $[\text{C}_x\text{H}_y]$  определяли из распределения углеводов с использованием метана в качестве внутреннего стандарта; его количественное значение определяли по данным анализа на насадочной колонке с фазой Rogapak Q.

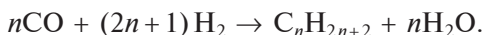
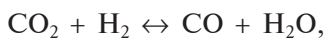
Для описания распределения образующихся углеводов использовали модель Андерсона—Шульца—Флори. Молекулярно-массовое распределение описывается формулой:

$$g_n = n \cdot (1 - \alpha)^2 \cdot \alpha^{n-1},$$

где  $g_n$  — массовая доля углеводов с  $n$  атомами углерода в молекуле,  $\alpha$  — коэффициент роста цепи. Величину  $\alpha$  определяли из угла наклона прямой, полученной в координатах  $\lg(g_n/n) - n$ .

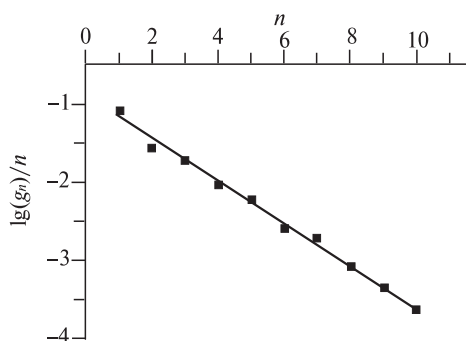
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с литературными данными [1—3], процесс гидрирования CO<sub>2</sub> с образованием широкого ряда углеводов рассматривают как двухстадийный:



На первой стадии диоксид углерода восстанавливается до монооксида углерода по обратной реакции водяного газа. На второй стадии происходит взаимодействие монооксида углерода с водородом (аналог синтеза Фишера—Тропша — каталитической конверсии синтез-газа с образованием углеводов).

При атмосферном давлении единственным продуктом взаимодействия CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub> является монооксид углерода, вторая стадия процесса не происходит. Селективность по CO составляет 100 %. Однако при повышенном давлении (при 8,5 МПа) катализатор FeK/C способствует также образованию углеводов и в незначительной степени кислородсодержащих соединений (этиловый, пропиловый и бутиловый спирты). В продуктах реакции



**Рис. 2.** Распределение углеводородов, образующихся при гидрировании  $\text{CO}_2$  ( $400^\circ\text{C}$ ,  $8,5\text{ МПа}$ ), по числу атомов углерода;  $g_n$  — массовая доля углеводородов с  $n$  атомами углерода в молекуле

регистрировали углеводороды  $\text{C}_1$ — $\text{C}_{10}$  линейного и изостроения, как насыщенные, так и олефины. Результаты каталитических экспериментов приведены в таблице. При температуре  $250^\circ\text{C}$  конверсия  $\text{CO}_2$  составляет около 1%. При этом преимущественно образуется монооксид углерода. С ростом температуры возрастает как конверсия, так и селективность по углеводородам.

Как следует из приведенных данных (таблица, температура  $400^\circ\text{C}$ ), более высокая температура активации в токе водорода ( $250$  и  $400^\circ\text{C}$ ) не приводит к изменению активности катализатора. Наблюдалось лишь незначительное различие в распределении продуктов. Это подтверждает ранее высказанное предположение, что образование активной фазы карбидов железа, ответственной за синтез углеводородов из  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ , происходит как при активации катализатора в токе водорода, так и в ходе реакции [7].

Молекулярно-массовое распределение полученных углеводородов, подчиняется распределению Андерсона—Шульца—Флори (см. рис. 2), что согласуется с представлением об образовании углеводородов из  $\text{CO}_2$  за счет гидрирования монооксида углерода на второй стадии процесса.

Таблица

**Результаты экспериментов по гидрированию  $\text{CO}_2$  на катализаторе  $\text{FeK/C}$  при  $250$ — $400^\circ\text{C}$  и  $8,5\text{ МПа}$**

$T, ^\circ\text{C}$	$X_{\text{CO}_2}, \%$	$S_{\text{CO}}, \%$	$S_{\text{C}_n\text{H}_m}, \%$	Распределение продуктов, %				$\text{C}_2$ — $\text{C}_4$ ол./ал.**	$\alpha^{***}$
				$\text{CH}_4$	$\text{C}_2$ — $\text{C}_4$	$\text{C}_{3+}$	Окс.*		
$250^a$	1	84	16	31,5	41,7	24,6	2,2	1,1	0,55
$300^a$	7	51	49	14,3	40,7	19,3	2,6	2,6	0,65
$350^a$	12	51	49	18,6	51,3	23,3	6,8	3,0	0,56
$400^a$	16	45	55	24,8	47,0	22,5	5,6	1,4	0,54
$400^b$	16	44	56	24,7	46,7	25,3	3,4	1,6	0,54

\* Окс. (оксигенаты): этанол, пропанол, бутанол.

\*\* Соотношение олефины/алканы углеводородов  $\text{C}_2$ — $\text{C}_4$ .

\*\*\* Коэффициент роста цепи.

<sup>a</sup> Активация в водороде при  $250^\circ\text{C}$ .

<sup>b</sup> Активация в водороде при  $400^\circ\text{C}$ .

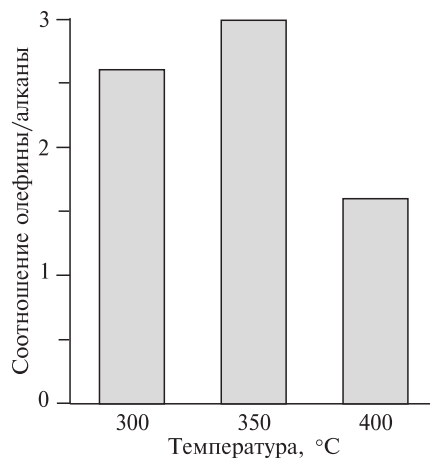


Рис. 3. Соотношение олефины/алканы углеводородов  $\text{C}_2\text{—C}_4$  в продуктах гидрирования  $\text{CO}_2$  на катализаторе FeK/C при 8,5 МПа

Максимальные значения конверсии  $\text{CO}_2$  (16 %) и селективности по углеводородам (56 %) получены при 400 °C. Однако наибольшее отношение олефины/алканы в газообразных углеводородах  $\text{C}_2\text{—C}_4$  равно 3, зафиксировано при 350 °C; оно снижается до 1,4—1,6 с ростом температуры до 400 °C (см. рис. 3).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучены закономерности гидрирования диоксида углерода на железосодержащем катализаторе FeK/C, промотированном калием. Проведение эксперимента при 8,5 МПа обуславливает более глубокое, по сравнению с 0,1 МПа, гидрирование  $\text{CO}_2$  в насыщенные и ненасыщенные углеводороды с коэффициентом роста цепи 0,54—0,65. Наилучшие показатели катализатора FeK/C достигнуты при температуре 400 °C, где соотношение олефины/алканы  $\text{C}_2\text{—C}_4$  углеводородов составило 1,6.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-20057, <https://rscf.ru/project/25-79-20057/>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Panzone C., Philippe R., Chappaz A., Fongarland P., Bengaouer A. // J.  $\text{CO}_2$  Utilization. 2020. Vol. 38. P. 314.
2. Wang W., Wang S., Ma X., Gong J. // Chem. Soc. Rev. 2011. Vol. 40. P. 3703.
3. Krausser L., Yang Q., Kondratenko E.V. // ChemCatChem. 2024. Vol. 16. No e202301716.
4. Pokusaeva Y.A., Koklin A.E., Lunin V.V., Bogdan V.I. // Mendeleev Commun. 2019. Vol. 29. P. 382.
5. Bogdan V.I., Pokusaeva Y.A., Koklin A.E., Savilov S.V., Chernyak S.A., Lunin V.V., Kustov L.M. // Energy Technol. 2019. Vol. 7. No 1900174.
6. Chernyak S.A., Ivanov A.S., Stolbov D.N., Maksimov S.V., Maslakov K.I., Chernavskii P.A., Pokusaeva Y.A., Koklin A.E., Bogdan V.I., Savilov S.V. // Carbon. 2020. Vol. 168. P. 475.
7. Bogdan V.I., Koklin A.E., Mishanin I.I., Chernavsky P.A., Pankratov D.A., Kim O.A., Bogdan V.I. // ChemPlusChem. 2024. Vol. 89. No e202400327.
8. Abelló S., Montané D. // ChemSusChem. 2011. Vol. 4. P. 1538.
9. Numpilai T., Witoon T., Chanlek N., Limphirat W., Bonura G., Chareonpanich M., Limtrakul J. // Appl. Catal. A-Gen. 2017. Vol. 547. P. 219.

10. Herranz T., Rojas S., Perez-Alonso F.J., Ojeda M., Terreros P., Fierro J.L.G. // *J. Catal.* 2006. Vol. 243. P. 199.
11. Chew L.M., Kangvansura P., Ruland H., Schulte H.J., Somsen C., Xia W., Eggeler G., Worayingyong A., Muhler M. // *Appl. Catal. A-Gen.* 2014. Vol. 482. P. 163.
12. Yang Q., Skrypnik A., Matvienko A., Lund H., Holena M., Kondratenko E.V. // *Appl. Catal. B-Environ.* 2021. Vol. 282. No 119554.
13. Hwang S.M., Zhang C.D., Han S.J., Park H.G., Kim Y.T., Yang S., Jun K.W., Kim S.K. // *J. CO<sub>2</sub> Util.* 2020. Vol. 37. P. 65.
14. Suppiah D.D., Daud W.M.A.W., Johan M.R. // *Energy Fuels.* 2021. Vol. 35. P. 17261.
15. Wei J., Yao R., Ge Q., Wen Z., Ji X., Fang C., Zhang J., Xu H., Sun J. *Catalytic* // *ACS Catal.* 2018. Vol. 8. P. 9958.
16. Albrecht M., Rodemerck U., Schneider M., Broering M., Baabe D., Kondratenko E.V. // *Appl. Catal. B-Environ.* 2017. Vol. 204. P. 119.
17. Yang Q., Kondratenko V.A., Petrov S.A., Doronkin D.E., Saraci E., Lund H., Arinchtein A., Kraehnert R., Skrypnik A.S., Matvienko A.A., Kondratenko E.V. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2022. Vol. 61. No e202116517.
18. Karnaukhov T., Likożar B., Kostyniuk A. // *Carbon Energy.* 2025. Vol. 7. No e70036.

## EFFECT OF PRESSURE ON CO<sub>2</sub> HYDROGENATION ON A CATALYST CONTAINING IRON ON A CARBON SUPPORT

**D.V. Vaskova** — Zelinsky Institute of Organic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Branch Institute of Photon Technologies, Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia. E-mail: darinavaskova@mail.ru

**A.E. Koklin** — Zelinsky Institute of Organic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Branch Institute of Photon Technologies, Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia. ORCID: 0000-0002-1304-2408. E-mail: koklin@ioc.ac.ru

**T.V. Bogdan** — Zelinsky Institute of Organic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Branch Institute of Photon Technologies, Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry, Moscow, Russia. ORCID: 0000-0002-1078-1141. E-mail: chemist2014@yandex.ru

**N.V. Minaev** — Zelinsky Institute of Organic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Branch Institute of Photon Technologies, Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia. ORCID: 0000-0002-9931-0118. E-mail: minaevn@gmail.com

**V.I. Bogdan** — Zelinsky Institute of Organic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Branch Institute of Photon Technologies, Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry, Moscow, Russia. ORCID: 0000-0001-9716-1748. E-mail: vibogdan@gmail.com (*for correspondence*)

The regularities of carbon dioxide hydrogenation on a Fe-containing catalyst supported on a carbon carrier was studied in the temperature range of 250–400 °C at a pressure of 0.1 and 8.5 MPa. During the CO<sub>2</sub> hydrogenation at 0.1 MPa, only CO is formed. At 8.5 MPa, a deeper hydrogenation of CO<sub>2</sub> occurs with hydrocarbons formation (the value of the chain growth probability coefficient  $\alpha = 0.54–0.65$ ), the selectivity to which increases with increasing temperature. The best results for hydrocarbon formation were obtained at 8.5 MPa and 400 °C, with the C<sub>2</sub>–C<sub>4</sub> olefin-to-alkane ratio reaching 1.6.

**Key words:** carbon dioxide, hydrogenation, hydrocarbons, olefins, CO<sub>2</sub> reduction, iron-containing catalyst, potassium, Fischer–Tropsch synthesis.

## REFERENCES

1. Panzone C., Philippe R., Chappaz A., Fongarland P., Bengaouer A. // J. CO<sub>2</sub> Utilization. 2020. Vol. 38. P. 314.
  2. Wang W., Wang S., Ma X., Gong J. // Chem. Soc. Rev. 2011. Vol. 40. P. 3703.
  3. Krausser L., Yang Q., Kondratenko E.V. // ChemCatChem. 2024. Vol. 16. No e202301716.
  4. Pokusaeva Y.A., Koklin A.E., Lunin V.V., Bogdan V.I. // Mendeleev Commun. 2019. Vol. 29. P. 382.
  5. Bogdan V.I., Pokusaeva Y.A., Koklin A.E., Savilov S.V., Chernyak S.A., Lunin V.V., Kustov L.M. // Energy Technol. 2019. Vol. 7. No 1900174.
  6. Chernyak S.A., Ivanov A.S., Stolbov D.N., Maksimov S.V., Maslakov K.I., Chernavskii P.A., Pokusaeva Y.A., Koklin A.E., Bogdan V.I., Savilov S.V. // Carbon. 2020. Vol. 168. P. 475.
  7. Bogdan T.V., Koklin A.E., Mishanin I.I., Chernavsky P.A., Pankratov D.A., Kim O.A., Bogdan V.I. // ChemPlusChem. 2024. Vol. 89. No e202400327.
  8. Abelló S., Montané D. // ChemSusChem. 2011. Vol. 4. P. 1538.
  9. Numpilai T., Witoon T., Chanlek N., Limphirat W., Bonura G., Chareonpanich M., Limtrakul J. // Appl. Catal. A-Gen. 2017. Vol. 547. P. 219.
  10. Herranz T., Rojas S., Perez-Alonso F.J., Ojeda M., Terreros P., Fierro J.L.G. // J. Catal. 2006. Vol. 243. P. 199.
  11. Chew L.M., Kangvansura P., Ruland H., Schulte H.J., Somsen C., Xia W., Eggeler G., Worayingyong A., Muhler M. // Appl. Catal. A-Gen. 2014. Vol. 482. P. 163.
  12. Yang Q., Skrypnik A., Matvienko A., Lund H., Holena M., Kondratenko E.V. // Appl. Catal. B-Environ. 2021. Vol. 282. No 119554.
  13. Hwang S.M., Zhang C.D., Han S.J., Park H.G., Kim Y.T., Yang S., Jun K.W., Kim S.K. // J. CO<sub>2</sub> Util. 2020. Vol. 37. P. 65.
  14. Suppiah D.D., Daud W.M.A.W., Johan M.R. // Energy Fuels. 2021. Vol. 35. P. 17261.
  15. Wei J., Yao R., Ge Q., Wen Z., Ji X., Fang C., Zhang J., Xu H., Sun J. Catalytic // ACS Catal. 2018. Vol. 8. P. 9958.
  16. Albrecht M., Rodemerck U., Schneider M., Broering M., Baabe D., Kondratenko E.V. // Appl. Catal. B-Environ. 2017. Vol. 204. P. 119.
  17. Yang Q., Kondratenko V.A., Petrov S.A., Doronkin D.E., Saraci E., Lund H., Arinchtin A., Kraehnert R., Skrypnik A.S., Matvienko A.A., Kondratenko E.V. // Angew. Chem. Int. Ed. 2022. Vol. 61. No e202116517.
  18. Karnaukhov T., Likožar B., Kostyniuk A. // Carbon Energy. 2025. Vol. 7. No e70036.
- 
-