

УДК 544.478.01, 66.094.25.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2024.2.7

## АКТИВНОСТЬ НАНЕСЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ ЖИДКОФАЗНОГО ГИДРИРОВАНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХАНОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ, И ИХ ТЕКСТУРНЫЕ СВОЙСТВА

© К. А. Никитин\*, А. В. Афиневский, Д. А. Прозоров,  
Т. Ю. Осадчая, Д. В. Смирнов, Е. П. Смирнов

*Ивановский государственный химико-технологический университет  
Россия, Ивановская область, 153000 г. Иваново, пр. Шереметьевский, 7.*

*\*Email: kirillnikitin09@gmail.com*

*Получен ряд новых катализаторов гидрирования на основе никеля, нанесенного на силикагель методом механохимии. Исследована поверхность полученного катализатора: удельная площадь поверхности, элементный состав, распределение никеля по поверхности носителя, термопрограммированное восстановление и десорбция водорода. Установлена активность синтезированных катализаторов. Полученные данные приведены в сравнении с катализаторами аналогичного состава, но полученными стандартным пропиточным (адсорбционным) методом.*

*Ключевые слова: механохимический синтез, никелевые катализаторы, гидрирование, формы адсорбированного водорода.*

### Введение

Реакции гидрирования лежат в основе многих крупнотоннажных химических производств, а также тонкого органического синтеза. Катализаторами реакций гидрирования, протекающих как в газовой, так и в жидкой фазах, являются переходные металлы, наиболее часто используют Pd, Ni, Pt, Co, Cu. Другие переходные металлы в качестве активного металла используются реже, но применяются в качестве промотирующих добавок [1–4]. Центральной задачей науки о катализе является разработка методик синтеза катализаторов с заданными параметрами активности и селективности. Согласно современным теоретическим представлениям, активность катализатора напрямую зависит от его адсорбционных свойств по отношению к реагирующим веществам [5–6]. В свою очередь, адсорбционные свойства формируются на стадии синтеза каталитической системы. Таким образом, актуальной задачей является оптимизация и интенсификация процесса синтеза гетерогенных катализаторов на основе переходных металлов с формированием заданной активной поверхности.

Одним из наиболее перспективных методов в формировании поверхности катализатора можно считать применение механохимической активации (МХА). Причем этот метод можно использовать как для предобработки исходных прекурсоров, например подложки катализатора перед нанесением активного металла [7], так и для непосредственного (в барабане механоактиватора) нанесения солей активных металлов на носитель [8].

Целью данного исследования является установление связи текстурных свойств нанесенных никелевых катализаторов, полученных в ходе механохимического синтеза, с их активностью в реакции восстановления двойной углеродной связи.

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Объекты исследования

При проведении экспериментальной части работы использовали следующие вещества для синтеза катализаторов и усиления вклада механоактивации:

- никель азотнокислый (II) 6-водный «ЧДА» ГОСТ 4055-78;
- диэтиловый эфир малеиновой кислоты (ДЭМК) ТУ 6-09-3932-87 «ХЧ», поставщик ООО «Кристалл-Центр»,  $\rho = 1,064 \text{ г/см}^3$ ;
- силикагель марки Л 5/40 мкм «ХЧ»;
- водород электролитический марки Б ГОСТ 3022-80;
- вода дистиллированная ГОСТ 6709-72;
- пропан-2-ол (изопропиловый спирт, ИПС) ГОСТ 9805-84;
- нитрат аммония «ХЧ» ГОСТ 22867-77.

В работе сравнены катализаторы, полученные с помощью механохимической активации (МХА) соли никеля и силикагеля; МХА соли никеля, силикагеля и модификатора (ИПС или  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), а также в качестве катализатора сравнения взят известный катализатор [1; 9], полученный методом пропитки.

Первый способ нанесения заключался в механохимическом нанесении шестиводной соли нитрата никеля на силикагель в планетарном механоактиваторе. Подробно методика синтеза описана в работе [10].

Второй способ заключался в схожем методе нанесения, только дополнительно были использованы модификаторы. Подробнее данная методика описана в работе [11]. В качестве модификаторов были выбраны изопропиловый спирт и нитрат аммония. Первый был выбран, так как по данным литературы [12] ПАВы увеличивают вклад механоактивации в процесс синтеза прекурсора. В качестве модификатора был выбран нитрат аммония, так как данная добавка позволяет увеличить дисперсность активного металла по поверхности подложки за счет общей природы реагентов и получения во время механоактивации двойной соли на поверхности подложки.

Количество подведенной энергии регулировалось временем МХА (с) и частотой подаваемого тока на электродвигатель (Гц); чем выше частота, тем большее ускорение действовало на частицы в барабане механоактиватора. В дальнейшем для краткости вместо времени МХА (с) и частоты подаваемого тока на электродвигатель (Гц) используется термин режим МХА (с/Гц) Режимы приготовления катализаторов по первому и второму способу сведены в *табл. 1*.

Таблица 1

Состав и условия синтеза каталитических систем

№	$\omega(\text{Ni})$ , % <sub>масс.</sub>	$\omega(\text{SiO}_2)$ , % <sub>масс.</sub>	Режим МХА, с/Гц	Модификатор
1	25	75	30с/40Гц	Нет
2	25	75	240с/40Гц	Нет
3	25	75	60с/40Гц	ИПС (4.2)**
4	25	75	60с/40Гц	Нет
5	25	75	60с/40Гц	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (1)**
6	12.	88	-*	Нет
7	18.8	81.2	-*	Нет
8	30.7	69.3	-*	Нет

\* катализатор, полученный методом пропитки [9]

\*\* в скобках указано соотношение массы (силикагель + соль никеля) к массе модификатора

## 2.2. Физико-химические методы исследования

При выполнении экспериментальной части работы были использованы стандартные методы физико-химических исследований: микрофотографии получены с помощью растрового электронного микроскопа VEGA 3 TESCAN. Измерение величин адсорбции индивидуальных форм водорода и их термодинамических характеристик проводили с помощью адсорбционной калориметрии, а также комплекса синхронного термического анализа и масс-спектрометрии, который включает в себя: прибор синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter® NETZSCH и масс-спектрометр QMS 403 C Aeolos®, системы дозирования реакционных газов PulseTA®, системы вакуумирования, а также высокотемпературную печь и сенсор для STA 449 F3 Jupiter®. Подробно методика проведения адсорбционного эксперимента описана в работе [6].

Подготовка образцов катализатора для определения активности и проведения комплекса синхронного термодинамического и масс-спектрального анализа проводилась по следующей методике. Свежеприготовленный нанесенный никелевый катализатор восстанавливали водородом в проточном реакторе, при температуре 470 °С. Далее катализатор остужали до комнатной температуры, после чего он мог быть перенесен под слой воды в кинетический реактор в количестве 1 грамм.

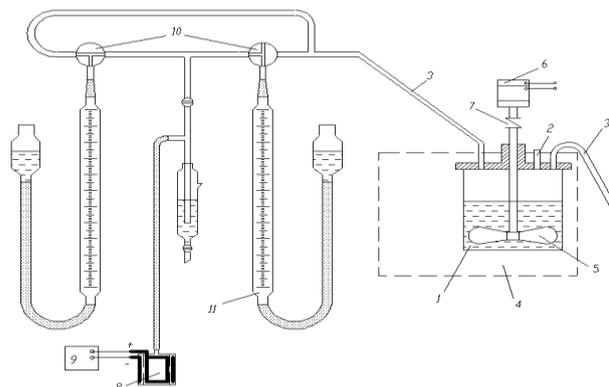
Катализатор насыщали водородом и под слоем выбранного растворителя вносили в кювету прибора термического анализа в количестве ~15 мг. Далее продували систему аргоном и проводили эксперимент. Первоначально для удаления растворителя, в качестве которого использовали дистиллированную воду, проводили выдержку при 30 °С в течение 4 ч. и далее поднимали температуру со скоростью 5 °С/мин до 900 °С. При этом проводили анализ отходящих газов с помощью масс-спектрометрии.

Термопрограммированное восстановление катализаторов проводили с помощью хемосорбционного анализатора Хемосорб (ООО «НЕОСИБ»). В качестве газа-носителя использовали аргон, концентрация водорода – 10%<sub>об.</sub>, интервал температур – 20–600 °С, скорость подъема температуры – 4 °С/мин.

## 2.3. Исследование кинетики

Активность катализаторов определяли в мягких условиях на установке для проведения жидкофазных реакций (*рис. 3*). Условия проведения эксперимента: 30 °С, атмосферное давление, скорость перемешивания – 3 500 об/с.

Для опыта катализатор восстанавливали в реакторе проточного типа в токе водорода, со скоростью подъема температуры 4 °С/мин, при достижении 470 °С выдерживали 15 мин. при этой температуре. Далее катализатор, под слоем воды, переносился в реактор (номер 1 на *рис. 1*) в количестве 1 грамм.



1 – реактор гидрогенизации; 2 – штуцер ввода гидрируемого соединения; 3 – штуцера для ввода и вывода водорода; 4 – жидкостной термостат; 5 – лопастная мешалка; 6 – асинхронный двигатель; 7 – соединительная муфта; 8 – электролизеры колокольного типа для получения водорода; 9 – источник питания электролизера; 10 – трехходовые краны, регулирующие подачу водорода в реактор; 11 – измерительные газовые бюретки с уравнительными склянками.

Рис. 1. Установка для исследования кинетических закономерностей реакций, протекающих в жидкой фазе [13]

За активность катализатора были приняты скорости восстановления двойной связи в молекуле диэтилового эфира малеиновой кислоты в начальный период времени (степень превращения 0.1). При таких степенях превращения в системе не накапливаются продукты и полупродукты реакции, и, следовательно, они не могут вступать в конкурентный механизм адсорбции с диэтиловым эфиром малеиновой кислоты и водородом. Расчет наблюдаемой константы скорости производили по формуле (1) [13].

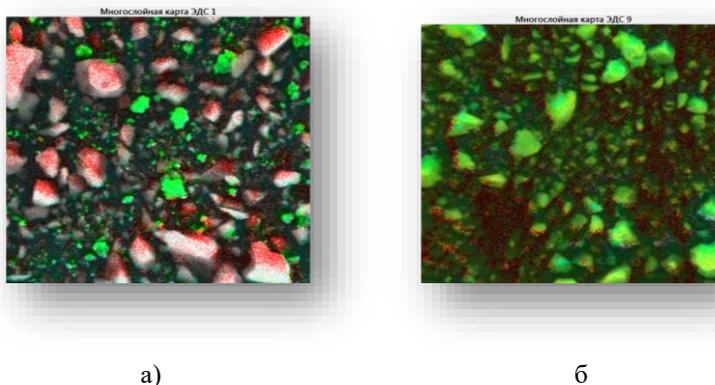
$$k_H = \frac{r_H \cdot \rho \cdot 760}{\alpha \cdot P_{H_2}} \quad (1)$$

где  $\rho$  – насыпная плотность катализатора,  $r_H$  – наблюдаемая скорость реакции в  $\text{см}^3(\text{H}_2) \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}(\text{Ni})$ ,  $\alpha$  – коэффициент Бунзена для водорода при 303 К в  $\text{см}^3(\text{H}_2) \cdot \text{см}^{-3}(\text{жидкой фазы})$ ,  $P_{H_2}$  – давление  $\text{H}_2$ , равное давлению в системе за вычетом давления насыщенных паров растворителя в мм.рт.ст.

### 3. Результаты и их обсуждение

#### 3.1. Текстуры свойства нанесенных никелевых катализаторов

На рис. 2 представлены микрофотографии катализаторов с растрового электронного микроскопа, совмещенные с энергодисперсионным анализом. По этим данным можно сделать вывод о влиянии механоактивации на синтез катализатора. Так, при малой подведенной энергии происходит плохое нанесение металла на подложку, это можно заметить по разрозненным фрагментам металла, которые хаотично разбросаны в отдельности от подложки (рис. 1а). Обратная картина наблюдается при достаточной подведенной энергии, за счет чего металл обволакивает поверхность подложки и закрепляется на ней (рис. 1б). Однако при большом количестве подведенной энергии может происходить закупорка пор подложки металлом, за счет чего происходит ухудшение каталитических свойств готового продукта. Было установлено, что затраченная энергия должна быть в диапазоне 0.3215–7.716 кДж/г. Оптимальное значение для лучшего нанесения носителя металла на поверхность подложки составило 1.929 кДж/г, что является средним значением по затрачиваемой энергии.



а)

б)

Рис. 2. Картирование поверхности готового катализатора, полученного при режимах механоактивации: а) 10 Гц/10с, б) 40 Гц/60с; размер видимого поля – 50 мкм; цветовая схема: никель – зеленый, кремний – красный, кислород – голубой.

Одной из важных текстурных характеристик катализатора является его удельная площадь поверхности. Зачастую чем больше удельная площадь поверхности, тем выше активность катализатора, рассчитанная на грамм, так как при большей площади поверхности на одном грамме находится больше активных центров. Тем не менее это не всегда выполняется в силу того, что при увеличении количества активных центров на грамм, не всегда увеличивается количество доступных для реагентов активных центров.

На рис. 3 представлены данные по низкотемпературной адсорбции азота, а также результаты обработки изотерм в рамках метода Брунауэра-Эммета-Тейлора [14]. По характеру изотерм адсорбции/десорбции азота можно сделать вывод об их типе, они относятся к IV типу, что говорит о мезопористости полученных образцов. Это подтверждается и распределением пор по размеру.

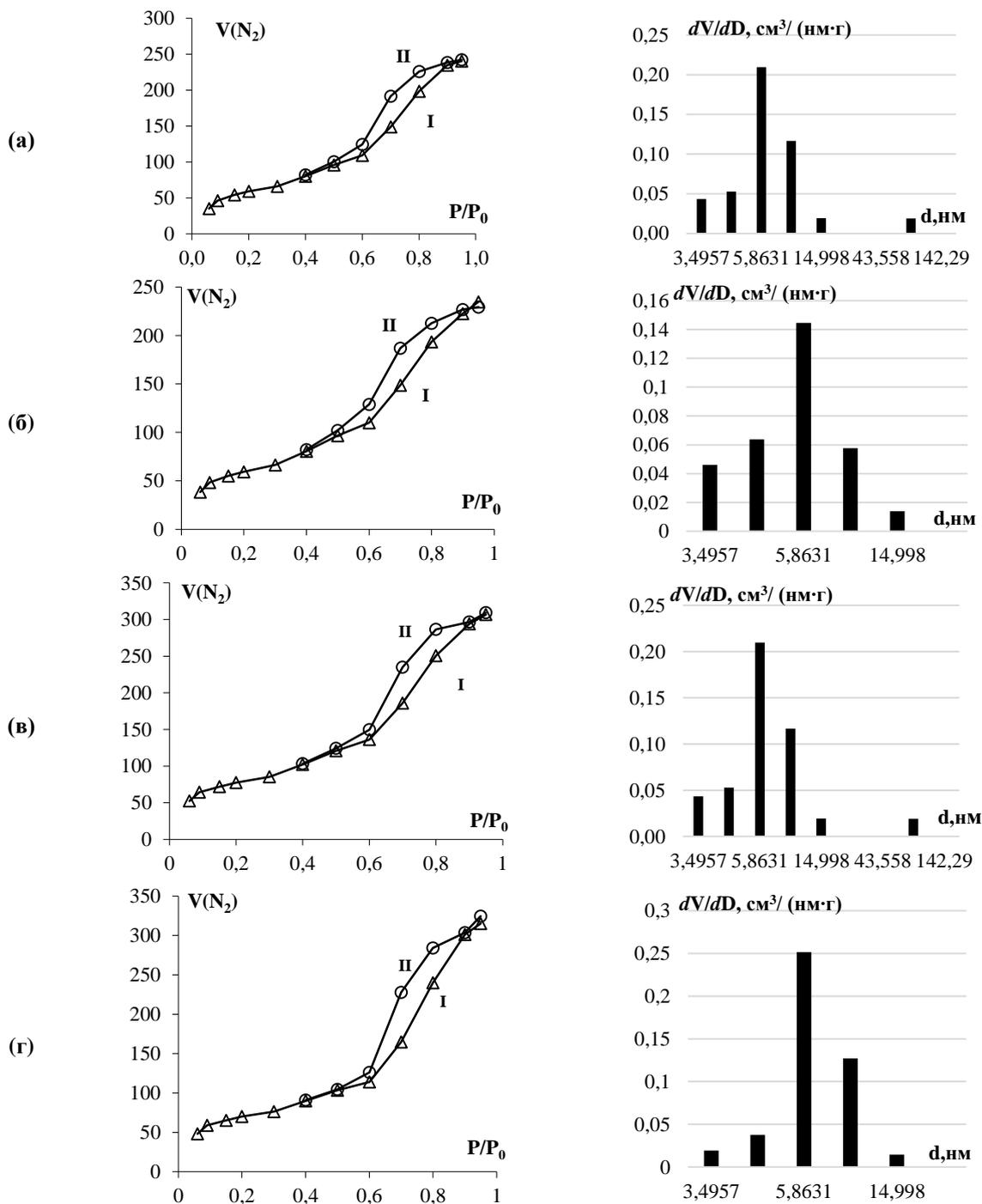


Рис. 3. Низкотемпературные изотермы адсорбции(I)/десорбции(II) и гистограммы распределения пор по радиусу:  
 а)  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  30c/40Гц; б)  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  240c/40Гц; в)  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  60c/40Гц;  
 г)  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  60c/40Гц + 42,3  $\text{NH}_4\text{NO}_3$

### 3.2. Активность в реакции восстановления двойной углеродной связи

В табл. 2 приведены основные кинетические параметры восстановления ДЭМК в водной среде на исследованных каталитических системах.

Таблица 2

Кинетические параметры реакции жидкофазного гидрирования двойной связи

№	с/Гц/название модификатора, ед.*	$\Gamma_{\alpha=0,1}, \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}(\text{Ni})^{-1}$	$\Gamma_{\alpha=0,5}, \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}(\text{Ni})^{-1}$	$n_{\alpha=0-0,5}$	$n_{\alpha=0,5-1}$	$k_{\text{H}_2}, \text{ с}^{-1}$
1	30/40/-	7.21	6.45	0.14	0.82	51.0
2	240/40/-	5.56	4.62	0.33	0.21	39.3
3	60/40/ИПС, 4.2	2.49	2.35	0.02	0.68	17.6
4	60/40	8.50	8.23	0.08	0.29	60.1
5	60/40/ $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 1	11.4	6.9	0.80	0.73	80.6
6	**	2.23	2.12	0.08	1.00	6.66
7	**	2.41	2.43	0.00	1.00	9.61
8	**	2.46	2.49	0.00	1.00	17.4

\* режим МХА и соотношение масс механоактивируемой смеси к модификатору;

\*\* катализатор, полученный методом пропитки [9].

Из анализа полученных данных видно, что скорость реакции сложным образом зависит от условий механохимического синтеза, а также от введения добавок. При подводимой частоте тока в 40 Гц, угловое ускорение на обрабатываемый прекурсор достигает 37 G. При механоактивации на таких режимах, с ростом времени до 60 с, наблюдается увеличение активности катализатора. Дальнейшее увеличение времени приводит к уменьшению активности катализаторов в реакции восстановления двойной углеродной связи. При времени активации более 200 сек. скорость падает до 5.56 против максимального значения  $8.5 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}(\text{Ni})^{-1}$  при 60 сек. Добавка нитрата аммония увеличивала активность катализатора, полученного при оптимальном режиме МХА на 34%. Подобные сложные зависимости можно объяснить изменением распределения активных центров на поверхности, в том числе по адсорбционным свойствам по отношению к водороду.

Так, механохимический синтез в сравнении с пропиточным методом нанесения оказывал заметное влияние на динамику восстановления металла на поверхности (см. рис. 4), увеличивая диапазон восстановления (преимущественно вправо), но при этом сдвигал максимумы температур восстановления с 420 до 380 °С.

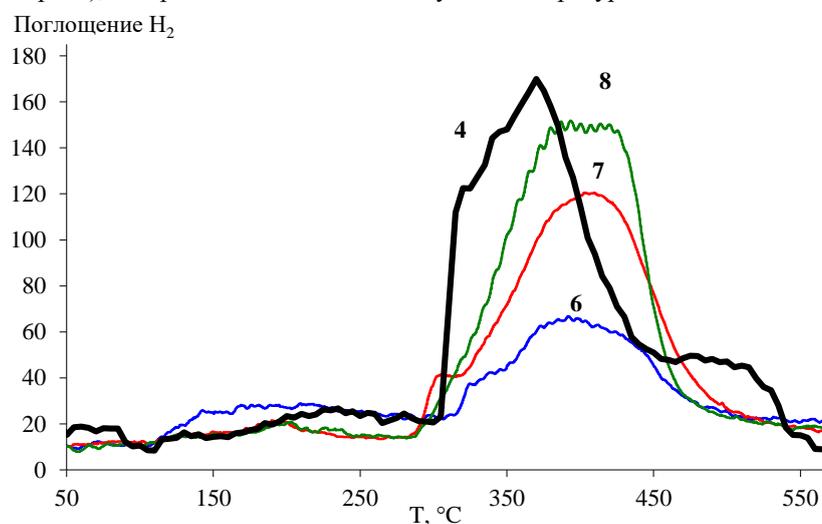


Рис. 4. Термопрограммированное восстановление никелевых катализаторов. Номера образцов соответствуют номерам в табл. 1 и 2.

Согласно данным литературы увеличение температуры активации приводит к уменьшению адсорбционной способности по отношению к водороду [15]. Также согласно данным работ [16–17], на нанесенных катализаторах адсорбируется относительно небольшое количество водорода до  $0.6 \text{ см}^3/\text{г}$ , по сравнению с массивными, например скелетным никелем — до  $20 \text{ см}^3/\text{г}$ . Поэтому даже незначительные изменения адсорбционных свойств катализатора приводят к заметному изменению активности. С целью подтвердить такое предположение был выполнен эксперимент с привлечением метода синхронного термического анализа и масс-спектрометрии. На рис. 5 приведены ионные токи, отвечающие за атомную массу 1 и 2. В таком виде этот метод аналогичен методу термопрограммированной десорбции, с тем отличием, что полезным сигналом является не теплопроводность газа, который позволяет рассчитать общую концентрацию водорода, а количество атомарного и количество молекулярного водорода.

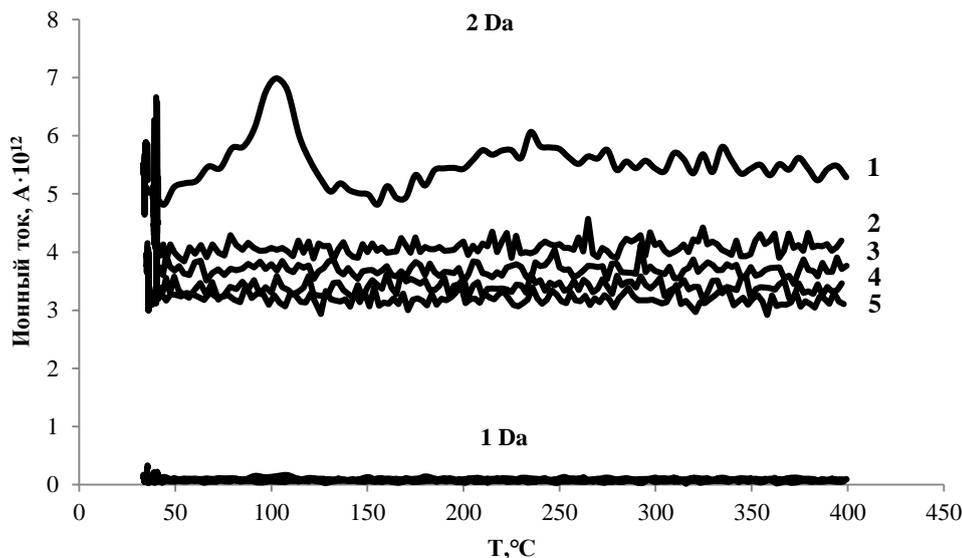


Рис. 5. Термопрограммированная десорбция (ТПД) водорода с катализаторов, полученных МХА. Ионные токи 1 и 2 Da соответствуют атомарному и молекулярному водородам. Номера образцов соответствуют номерам в табл. 1 и 2

Согласно экспериментальным данным масс-спектрометрии на поверхности всех каталитических систем наблюдается наличие молекулярного водорода, наибольшее его количество на катализаторе, полученном в мягких условиях механоактивации (каталитическая система №1), при этом максимум десорбции наблюдается в интервалах 35–42 °С (у всех образцов), 75–125 °С и 230–250 °С (у образца №1). Увеличение количества подводимой энергии при синтезе приводит к резкому уменьшению количества молекулярного водорода. При этом количество атомарного водорода в исследуемых системах незначительно, в отличие от аналогичных экспериментов для скелетного никелевого катализатора [17] и нанесенных пропиточным методом катализаторов [16].

Согласно данным литературы именно низкотемпературные молекулярные формы адсорбированного водорода участвуют в реакции гидрирования кратных углеродных связей [18]. Этот вывод подтверждают данные, представленные на рис. 5. Однако оказывается, что значение имеет не столько высота (площадь) пика, сколько его положение. Так, самые активные катализаторы имеют пик близкий к 35 °С, а наименее активные: №2 ( $r_{\alpha=0,1} = 5.56 \cdot \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \Gamma(\text{Ni})^{-1}$ ) – 40.1 °С; №3 ( $r_{\alpha=0,1} = 2.49 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \Gamma(\text{Ni})^{-1}$ ) – 43 °С.

При этом в литературе имеется информация о том, что уменьшение температуры восстановления катализатора увеличивает величины адсорбции молекулярного водорода [15]. Это хорошо отражается на данных по термопрограммируемому восстановлению катализаторов гидрирования на рис. 4. Они показывают, что катализатор, полученный с применением механоактивации, восстанавливается при более низких температурах по сравнению с традиционным методом пропитки. Температура восстановления смещается практически на 80–100 °С.

### Заключение

В результате проведенного исследования показана возможность применения механохимического синтеза для получения катализаторов жидкофазного гидрирования, уменьшая тем самым количество стадий синтеза и практически сводя на нет образование побочных продуктов (в т.ч. промывочных вод). Экспериментально доказано наличие молекулярного и атомарного водорода на поверхности катализатора в водной среде. Установлено, что положение температурного максимума на термопрограммируемой десорбции водорода оказывает влияние на активность катализатора: чем ниже температура, тем выше активность. Показано, что при механохимической активации смеси подложки (силикагеля) и нитрата никеля происходит равномерное распределение металла по поверхности носителя. Полученный катализатор обладал большей каталитической активностью в реакции восстановления кратной углеродной связи по сравнению с аналогичным по химическому составу катализаторами, полученными методами пропитки [19].

Исследование кинетических свойств катализаторов было выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-23-00362. URL: <https://rscf.ru/project/24-23-00362/>

Исследование физико-химических свойств катализаторов было выполнено за счет финансирования Государственного задания FZZW-2024-0004.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Stoffels M. A., Klauck F. J., Hamadi T., Glorius F. Technology trends of catalysts in hydrogenation reactions: a patent landscape analysis // *Advanced synthesis & catalysis*. 2020. Vol. 362. No. 6. P. 1258–1274.
2. Навалихина М. Д., Крылов О. В. Гетерогенные катализаторы гидрирования // *Успехи химии*. 1998. Т. 67. №7. С. 656–687.
3. Касьянова Л. З. и др. Никелевый катализатор гидрирования ненасыщенных углеводородов // *Башкирский химический журнал*. 2016. Т. 23. №1. С. 30–33.
4. Магдалинова Н. А., Калмыков П. А., Клюев М. В. Катализаторы гидрирования на основе платино- и палладийсодержащих наноалмазов // *Журнал общей химии*. 2014. Т. 84. №1. С. 35–42.
5. Ягодковский В. Д. Модифицирование каталитических и адсорбционных свойств металлов и оксидов // *Журнал физической химии*. 2015. Т. 89. №11. С. 1758–1767.
6. Прозоров Д. А., Смирнов Д. В., Афинеевский А. В. и др. Исследование адсорбции водорода на нанесенных катализаторах реакций с участием водородсодержащих газов // *Вестник Технол.о ун-та*. 2021. Т. 24. №6. С. 49–54.
7. Аникина В. И. и др. Разрушение и трансформация кристаллической решетки глинозема при механоактивации // *Журнал Сибирского фед. ун-та. Техника и технологии*. 2015. Т. 8. №7. С. 851–860.
8. Широков, Ю. Г. Восстановительная способность металлов в механохимическом синтезе катализаторов // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2008. Т. 51. №10. С. 3–17.
9. Патент № 2604093 С1 РФ, МПК В01J 37/02, В01J 23/755. Способ получения катализатора реакций гидрогенизации: №2015143251/04: заявл. 09.10.2015, опубл. 10.12.2016 / Т. Ю. Осадчая, А. В. Афинеевский, Д. А. Прозоров; заявитель ФГБОУ высшего профессионального образования «Ивановский государственный химико-технологический университет» (ИГХТУ).
10. Патент №2796743 С1 РФ, МПК В01J 37/04, В01J 23/755, В01J 37/08. Способ механохимического синтеза никелевого катализатора гидрирования: №2021135159; заявл. 01.12.2021, опубл. 29.05.2023 / К. А. Никитин, А. В. Афинеевский, Т. Ю. Осадчая [и др.]; заявитель ФГБОУ высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет».
11. Патент №2796743 С1 РФ, МПК В01J 37/04, В01J 23/755, В01J 37/08. Способ механохимического синтеза никелевого катализатора гидрирования: №2021135159; заявл. 01.12.2021, опубл. 29.05.2023 / К. А. Никитин, А. В. Афинеевский, Т. Ю. Осадчая [и др.]; заявитель ФГБОУ высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет».
12. Kirovskaya I. A. et al. Mechanochemical activation and gallium and indiaarsenides surface catalycity // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2018. Т. 944. №1. С. 012047.
13. Афинеевский А. В., Князев А. В., Лукин М. В. и др. Каталитические свойства и дезактивация скелетного никеля в реакциях жидкофазной гидрогенизации / *Ивановский государственный химико-технологический университет* / под ред. А. В. Князева. Казань: ООО «Бук», 2018. 316 с. ISBN 978-5-00118-185-9.
14. Гаврилова Н. Н. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных / Н. Н. Гаврилова, В. В. Назаров. М.: Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, 2015. 132 с. ISBN 978-5-7237-1305-5.
15. Кулакова И. И. Каталитическая химия. Ч. 1. Основы катализа / И. И. Кулакова, Г. В. Лисичкин. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2014. 112 с.
16. Сухачев Я. П. и др. Величины адсорбции водорода из воды на нанесенных на силикагель никелевых катализаторах // *Вестник Тверского гос. ун-та. Серия: Химия*. 2018. №3. С. 89–102.
17. Прозоров Д. А., Смирнов Д. В., Афинеевский А. В. и др. Исследование адсорбции водорода на нанесенных катализаторах реакций с участием водородсодержащих газов // *Вестник Технол. ун-та*. 2021. Т. 24. №6. С. 49–54.
18. Лукин М. В. и др. Зависимость термодинамических характеристик форм водорода, адсорбированных на поверхности пористого никеля, от степени дезактивации // *Журнал физической химии*. 2013. Т. 87. №7. С. 1113–1118.
19. Сокольский Д. В. Гидрирование в растворах. Изд-во АН КазССР, 1962.

*Поступила в редакцию 03.05.2024 г.*

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2024.2.7

**ACTIVITY OF SUPPORTED NICKEL CATALYST FOR LIQUID-PHASE HYDROGENATION OBTAINED USING MECANO-CHEMICAL ACTIVATION AND THEIR TEXTURAL PROPERTIES**

© **K. A. Nikitin\***, **A. V. Afineevskii**, **D. A. Prozorov**,  
**T. Yu. Osadchaya**, **D. V. Smirnov**, **E. P. Smirnov**

*Ivanovo State University of Chemical Technology  
7 Sheremetevsky Ave., 153000 Ivanovo, Russia.*

*\*Email: kirillnikitin09@gmail.com*

A number of new hydrogenation catalysts based on nickel deposited on silica gel by mechanochemistry have been obtained. The surface of the obtained catalyst was studied: specific surface area, elemental composition, distribution of nickel over the surface of the carrier, thermoprogrammed reduction and desorption of hydrogen. The activity of synthesized catalysts has been established. The data obtained are compared with the data on catalysts of similar composition synthesized by the standard impregnation (adsorption) method.

**Keywords:** mechanochemical synthesis, nickel catalysts, hydrogenation, forms of adsorbed hydrogen.

*Received 03.05.2024 г.*