

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 544.476.2: 544.478.6

**ЖИДКОФАЗНОЕ ГИДРИРОВАНИЕ 1-МЕТИЛ-4-НИТРОБЕНЗОЛА  
В УСЛОВИЯХ ЧАСТИЧНОЙ ДЕЗАКТИВАЦИИ НАНЕСЕННОГО  
НИКЕЛЕВОГО КАТАЛИЗАТОРА****Татьяна Юрьевна Осадчая, Андрей Владимирович Афинеевский,  
Дмитрий Алексеевич Прозоров, Кирилл Андреевич Никитин,  
Дмитрий Владимирович Смирнов**

Ивановский государственный химико-технологический университет, научно-исследовательская лаборатория синтеза, исследований и испытания каталитических и адсорбционных систем для процессов переработки углеводородного сырья, Иваново, Россия

**Автор, ответственный за переписку:** Татьяна Юрьевна Осадчая,  
osadchayaty@gmail.com

**Аннотация.** В работе представлено исследование кинетических особенностей жидкофазного гидрирования 1-метил-4-нитробензола (4-нитротолуола) в присутствии нанесенного никелевого катализатора Ni/SiO<sub>2</sub>, модифицированного контролируемым введением сульфид-ионов. Целью исследования является определение связи между степенью дезактивации активных центров катализатора и его каталитической активностью в реакции восстановления нитрогруппы. Синтезированы шесть катализаторов с разным содержанием никеля, физико-химические свойства которых были охарактеризованы с использованием методов энергодисперсионного анализа, рентгенофазового анализа и низкотемпературной адсорбции азота. Контролируемая дезактивация осуществлялась введением различного количества раствора Na<sub>2</sub>S в реакционную среду. Установлено, что сульфид-ион преимущественно взаимодействует с поверхностными атомами никеля, снижая активность катализатора пропорционально количеству адсорбированных ионов. Экспериментально определено, что в среднем 1,5 атома серы блокируют один атом поверхностного Ni<sup>0</sup>. Продемонстрировано, что частичная дезактивация позволяет целенаправленно варьировать активность и потенциально селективность катализатора за счет модификации его поверхности. Результаты указывают на возможность использования дезактивации в качестве инструмента тонкой настройки каталитических свойств в гидрогенизационных процессах.

**Ключевые слова:** 4-нитротолуол, дезактивация катализатора, сульфидирование, модификация поверхности катализатора

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2026-67-1-64-71

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания на выполнение НИР (Тема № FZZW-2024-0004). План работ согласован с НИР Научного совета РАН по физической химии на 2025.

**Для цитирования:** Осадчая Т.Ю., Афинеевский А.В., Прозоров Д.А., Никитин К.А., Смирнов Д.В. Жидкофазное гидрирование 1-метил-4-нитробензола в условиях частичной дезактивации нанесенного никелевого катализатора // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2026. Т. 67. № 1. С. 64–71.

ORIGINAL ARTICLE

**LIQUID-PHASE HYDROGENATION OF 1-METHYL-4-NITROBENZENE UNDER CONDITIONS OF PARTIAL DEACTIVATION OF THE SUPPORTED NICKEL CATALYST**

**Tatiana Yu. Osadchaya, Andrei V. Afineevskii, Dmitry A. Prozorov, Kirill A. Nikitin, Dmitry V. Smirnov**

Research laboratory of synthesis, research and testing of catalytic and adsorption systems for hydrocarbon raw material processing processes, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russian Federation

**Corresponding author:** Tatiana Yu. Osadchaya, osadchayaty@gmail.com

**Abstract.** The activity of supported nickel catalyst Ni/SiO<sub>2</sub> in the liquid-phase hydrogenation of 1-methyl-4-nitrobenzene under partial controlled deactivation was studied. Catalysts with different amounts of supported nickel, which were partially deactivated by sulfide ion in a controlled manner, were used for the study. A method for determining the amount of reduced metal on the catalyst surface was proposed. The amounts of sulfide ion required to deactivate active centers were determined. The method of K.H. Bartholomew was used to assess the nature of catalyst deactivation. The number of active nickel atoms blocked by one sulfide ion was calculated.

**Keywords:** supported nickel catalyst, 4-nitrotoluene, catalyst deactivation, liquid phase hydrogenation

**Financial Support.** The work was carried out with the financial support of the state assignment for the implementation of research (Topic No. FZZW-2024-0004). The work plan is agreed with the research of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Physical Chemistry for 2025.

**For citation:** Osadchaya T.Yu., Afineevsky A.V., Prozorov D.A., Nikitin K.A., Smirnov D.V. Liquid-phase hydrogenation of 1-methyl-4-nitrobenzene under conditions of partial deactivation of the supported nickel catalyst // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Chemistry. 2026. T. 67. № 1. S. 64–71.

Одним из эффективных способов регулирования каталитической активности, селективности и стабильности каталитических систем является введение промотирующих или дезактивирующих добавок [1–3]. Механизм действия ядов объясняется их избирательной адсорбцией на поверхности катализатора и конкуренцией с исходными реагентами за активные центры [4]. В результате часть поверхности катализатора становится недоступной для реактантов, что снижает его активность, но при этом может повышать устойчивость к внешним факторам. Примером последнего является процесс сульфидирования, при котором атомы серы образуют прочные связи с активными центрами [5, 6]. В работе [7] показано, что при отравлении никеля сероводородом ионы S<sup>2-</sup> за счет более высокого адсорбционного потенциала способны вытеснить даже прочносвязанные формы адсорбированного водорода. Кроме того, при гидрировании ряда органических соединений воз-

можно дезактивирование активных центров поверхности катализатора [8], при этом может наблюдаться торможение реакции продуктами гидрирования [9].

Морфология и текстурные свойства катализатора (в частности, размер частиц) существенно влияют на число активных центров и их адсорбционные свойства [10–13]. Для каждого гидрируемого соединения существует свой оптимальный размер кристаллитов никеля, определяющий количество сорбированного водорода и его энергию связи, а также удельную поверхность, стабильность и устойчивость катализатора [14]. При этом небольшое количество каталитического яда может повышать каталитическую активность благодаря увеличению удельной поверхности катализатора [15, 16].

Активность и селективность катализаторов жидкофазного гидрирования во многом связывают [15, 17, 18] с наличием различных форм адсор-

бированного водорода, которые обладают разной реакционной способностью. Однако влияние этих форм на кинетику реакций обычно оценивается косвенными методами. Доказано существование равновесия между различными формами адсорбированного водорода, которое изменяется в зависимости от условий реакции (состав растворителя или наличие каталитических ядов) [15, 17]. Равновесия адсорбированных форм водорода на поверхности различных катализаторов, в том числе нанесенных никелевых, изучены методами адсорбционной калориметрии, химического обезводороживания, синхронного термического анализа и масс-спектрометрии [19]. Совмещение данных адсорбционного и кинетического экспериментов при частичной дезактивации катализатора позволяет определить константы реакционной способности различных форм водорода [20].

Таким образом, одной из важных задач характеристики катализатора является определение числа активных центров на его поверхности. В случае равномерного блокирования дезактивирующим агентом активных центров катализатора [16, 19, 21] можно определить число этих центров по числу адсорбированных атомов каталитического яда.

Цель настоящей работы – изучение влияния контролируемой блокировки активных центров (дезактивации) никелевого катализатора ( $\text{Ni/SiO}_2$ ) сульфид-ионами на кинетику жидкофазного восстановления 4-нитротолуола в зависимости от количества восстановленного металла.

Продуктом гидрирования 4-нитротолуола является 4-аминотолуол (*n*-толуидин) – промышленно важное соединение, которое входит в состав ингибиторов коррозии, а также используется для получения различных красителей. Выбор сульфида натрия в качестве дезактивирующего агента обусловлен тем, что соединения серы являются наиболее распространенными каталитическими ядами, которые способны блокировать активные центры никелевых катализаторов, изменяя их активность в реакциях гидрирования нитросоединений [21]. Оптимальными растворителями для большинства нитросоединений служат низшие спирты. В работе, исходя из производственных соображений, были выбраны водные и водно-спиртовые растворы.

### Экспериментальная часть

В настоящей работе синтезированы шесть катализаторов, различающихся содержанием никеля, нанесенного на силикагель, по методике [22].

В 15 мл водного раствора нитрата никеля с концентрацией 50, 40, 30, 20, 15 и 10 мас.% вносили 1 г силикагеля Л 5/40 $\mu$  ( $\text{SiO}_2$ ) и проводили пропитку при перемешивании магнитной мешалкой с частотой 1 Гц в течение 4 ч при температуре 30 °С. Пропитанный силикагель отделяли от раствора на фильтре Шотта, сушили при 80 °С (2 ч) и прокаливали при 470 °С (2–3 ч). Перед кинетическими испытаниями катализаторы восстанавливали в трубчатой печи при 470 °С в токе водорода (скорость нагрева составляла 4 °С/мин, выдержка при 470 °С – 15 мин).

Элементный состав приготовленных образцов определяли с помощью энергодисперсионного анализа (ЭДА) на приборе NanoAnalysis (Oxford Instruments, Великобритания). Так как для синтеза катализатора использовали силикагель, максимум распределения размера частиц которого составляет 5 мкм, а глубина формирования сигнала для ЭДА в случае силикагеля также равна ~5 мкм, полученные данные можно считать репрезентативными для всей гранулы катализатора.

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на дифрактометре Bruker D8 Advance ( $\text{CuK}\alpha$ -излучение, 40 кВ, 20 мА,  $2\theta = 10\text{--}90$  град., скорость сканирования 4 град./мин, шаг 0,01 град.). Фазовую идентификацию осуществляли с использованием базы данных МИНКРИСТ. Размер кристаллитов никеля ( $d_B$ , нм), дисперсность ( $D$ , %), площадь активной поверхности ( $S_{\text{Ni}^0}$ , м<sup>2</sup>/г) рассчитывали по формулам [23, 24]:

$$d_B = \frac{K \cdot \lambda}{B_d(2\theta) \cos \theta}, \quad (1)$$

$$D = \frac{6 \cdot 10^7 \cdot M \cdot \sigma}{\rho \cdot N_a \cdot d_B} 100\%, \quad (2)$$

$$D^0 = D \cdot \frac{x}{100\%}, \quad (3)$$

$$S_{\text{Ni}^0} = \frac{6 \cdot 10^3 \omega \cdot x}{\rho \cdot d_B (100\%)^2}, \quad (4)$$

$$n_{\text{Ni}} = \frac{\sigma \cdot S_{\text{Ni}^0}}{6,02 \cdot 10^{19}}, \quad (5)$$

где  $B_d(2\theta)$  – уширение рефлекса (град.),  $K$  – константа Шеррера [25],  $\theta$  – положение рефлекса (град.),  $\lambda$  – рентгеновская длина волны ( $\lambda = 0,15406$  нм);  $\sigma$  – концентрация атомов металла на поверхности кристаллита ( $1,54 \cdot 10^{15}/\text{см}^2$  для Ni

[26]);  $\omega$  – массовая доля никеля, нанесенного на носитель (%),  $\rho$  – плотность металла (8,9 г/см<sup>3</sup> для Ni);  $M$  – молярная масса (для никеля 58,7 г/моль);  $N_a = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>;  $D^0$  – дисперсность с учетом степени восстановления (%),  $x$  – доля восстановленного металла,  $n_{Ni^0}$  – число молей восстановленного никеля на поверхности катализатора.

Долю восстановленного металла ( $x$ , %) определяли с помощью растворения в соляной кислоте по количеству выделившегося водорода.

Удельную поверхность катализаторов измеряли методом низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ) с использованием комплекса Sorbi MS (Россия, Новосибирск).

Контролируемую дезактивацию катализаторов проводили по методике [27]. Перед кинетическими опытами в реактор добавляли 0,1–0,3 мл 0,025 М раствора Na<sub>2</sub>S на 100 мл жидкой фазы. Водородный показатель раствора соответствовал показателю реакционной среды. Процесс дезактивации осуществляли под атмосферой водорода при перемешивании жидкой фазы.

Количество вводимого сульфида выбирали так, чтобы снизить активность катализатора незначительно, но больше, чем составляет по-

грешность кинетического эксперимента (10–15%). Таким образом, для каждого катализатора было получено по четыре образца, обработанных разным количеством сульфида. В качестве модельного соединения использовали 4-нитротолуол, восстановление которого газообразным водородом проходит без образования побочных продуктов [28, 29].

Гидрирование проводили статическим методом в герметизированной системе с контролируемой подачей газообразного водорода. Реактор объемом 400 мл термостатировали при 30 °С. Реакционную смесь перемешивали со скоростью вращения мешалки 3600 об/мин, что позволяло исключить влияние внешнего массопереноса на результаты эксперимента. В процессе реакции измеряли объем поглощенного водорода. В работе испытаны два растворителя. В качестве первого использовали дистиллированную воду, в качестве второго – смесь дистиллированной воды и 2-пропанола в соотношении 1:1 по объему.

Для оценки каталитической активности использовали скорость реакции при низкой степени превращения, пока не успели накопиться промежуточные вещества и еще не оказывают действия

Т а б л и ц а 1

**Физико-химические свойства катализаторов**

Номер катализатора	Масса Ni (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> на 1 г SiO <sub>2</sub> , г	$\omega$ (Ni), %	$S_{уд.}$ , м <sup>2</sup> /г	$x$ , %	$d$ , нм	$D$ , %	$D^0$ , %	$S_{Ni^0}$ , м <sup>2</sup> /г
I	6,7	27,59	264,0±0,7	39,9	17,7	5,72	2,28	4,19
II	5,3	20,50	296,3±0,9	43,9	15,5	6,53	2,87	3,91
III	4,2	18,75	317,6±0,5	37,3	10,0	10,12	3,77	4,73
IV	5,5	10,46	338,4±0,5	47,8	9,8	10,33	4,94	3,45
V	1,8	9,09	362,0±0,9	44,0	9,5	10,65	4,69	2,84
VI	1,0	6,07	364,0±0,8	9,9	9,1	11,12	1,10	0,45

Т а б л и ц а 2

**Количество Na<sub>2</sub>S, необходимое для полной дезактивации катализатора, ммоль/г**

Номер катализатора*	Количество Na <sub>2</sub> S, ммоль/г					
	I	II	III	IV	V	VI
Растворитель						
вода	0,564	0,135	0,134	0,130	0,111	0,078
2-пропанол : вода	0,470	0,230	0,192	0,159	0,150	0,101

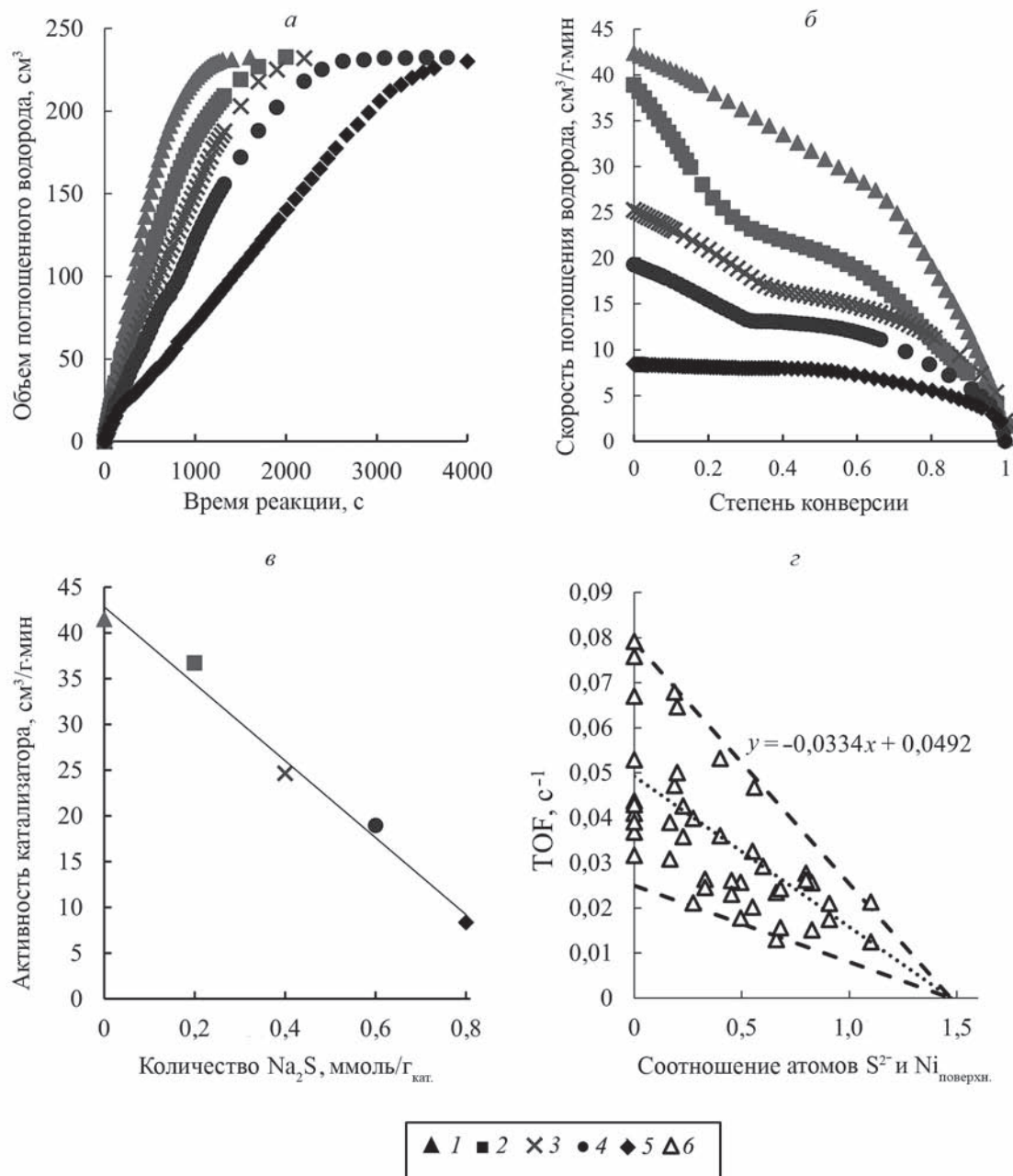
\* Номера катализаторов совпадают с номерами в табл. 1.

побочные процессы. В этом случае скорость реакции определяется исключительно реакционной способностью адсорбированного водорода.

### Основная часть

Основные физико-химические характеристики исследованных образцов никелевых катализа-

торов, нанесенных на  $\text{SiO}_2$ , приведены в табл. 1. Анализируя представленные данные, можно отметить, что увеличение содержания никеля сопровождается снижением удельной поверхности катализатора, этот факт можно объяснить блокированием пор носителя. Снижение удельной поверхности катализатора, в свою очередь, может



Гидрирование 4-нитротолуола на  $\text{Ni}/\text{SiO}_2$ : а – исходные кинетические данные по объему поглощения водорода за время реакции; б – зависимость скорости поглощения водорода от степени конверсии; в – активность катализатора в ходе гидрирования 4-нитротолуола на  $\text{Ni}/\text{SiO}_2$  (№ II в табл. 1) в растворителе (вода); з – частота оборотов (TOF) для всех опытов в двух растворителях в зависимости от введенного количества сульфида натрия, нормированного на количество поверхностного никеля (1 – свежий катализатор; 2 – добавлено  $\text{Na}_2\text{S}$ , мл: 0,2; 3 – 0,4; 4 – 0,6; 5 – 0,8; 6 – все опыты). Во всех случаях масса катализатора составляла 2,5 г, масса введенного 4-нитротолуола – 0,4 г, температура проведения опыта 303 К

обусловить снижение активности, отнесенной к массе никеля. Однако при снижении содержания никеля наблюдается уменьшение размеров кристаллитов и рост дисперсности, что может снижать стабильность частиц и уменьшать количество структурного водорода, который может храниться в растворенном виде в кристаллите. При этом площадь активной поверхности ( $S_{Ni^0}$ ) изменяется немонотонно. Это обусловлено тем, что площадь активной поверхности определяется произведением дисперсности и содержанием металла, которые антибатны друг другу.

Для оценки влияния физико-химических характеристик катализатора на его активность и устойчивость к отравлению сульфид-ионами были проведены кинетические эксперименты по восстановлению 4-нитротолуола в различных растворителях (вода и 2-пропанол : вода) в условиях частичной контролируемой дезактивации (рисунок). На рисунке, *a* в качестве примера представлены исходные данные по объему поглощенного водорода за прошедшее время реакции гидрирования 4-нитротолуола на Ni/SiO<sub>2</sub> (II в табл. 1). На основании полученных экспериментальных данных были рассчитаны значения скорости гидрирования в зависимости от степени конверсии (см. пример для образца II на рисунке, *b*). По этим данным были рассчитаны величины активности катализаторов (см. пример для образца II на рисунке, *в*).

Полученные кинетические закономерности для реакции гидрирования 4-нитротолуола можно объяснить с позиций изменения скорости отдельных стадий превращения нитрогруппы в стехиометрическом механизме реакций жидкофазного гидрирования замещенных нитробензолов. Изучение влияния растворителя на кинетические закономерности гидрирования замещенных нитробензолов проводили в ряде исследований [30]. Показано, что в нейтральных средах гидрирование нитрогруппы протекает преимущественно по гидрогенизационному направлению, без накопления в системе значительного количества продуктов неполного восстановления нитрогруппы, а в щелочных повышается вклад конденсационного направления, при этом в системе накапливаются продукты неполного восстановления нитрогруппы и реакций гомогенной гидрогенизации нитрогруппы – азокси- и азосоединения. Полупродукты могут оказывать тормозящее действие на катализатор, частично дезактивируя его. Этим, вероятно,

можно объяснить нелинейность изменения активности на кинетических кривых.

Построение графика зависимости активности катализатора от введенного количества каталитического яда (рисунок, *в*) и экстраполирование линии тренда позволяет понять, какое количество сульфида приведет к полной потере катализатором своей активности. Полученные данные для всех катализаторов и двух растворителей приведены в табл. 2.

Ключевым фактором, как показывает анализ полученных данных, является количество никеля, что свидетельствует о преимущественной адсорбции сульфид-ионов именно на активных центрах Ni. Это подтверждено экспериментально и согласуется с литературными источниками [16, 20, 27, 31]. График, построенный в координатах TOF –  $f(n_{\text{кат.яд.}}/n_{Ni^0})$ , позволил определить, что в среднем 1,5 атома серы блокируют один поверхностный атом Ni<sup>0</sup>.

В работе [15] показана применимость методики оценки характера дезактивации катализатора, предложенной К.Х. Бартоломью [21] для процессов жидкофазного гидрирования по отклонению измеренных значений от линии тренда (рисунок, *в*). Во всех случаях наблюдалось неселективная дезактивация.

Можно утверждать, что сульфид натрия позволяет модифицировать поверхность катализатора. Экспериментально доказано, что целенаправленная частичная дезактивация катализатора ионами серы изменяет его активность в реакциях жидкофазного гидрирования соединений, содержащих в своем составе нитрогруппу. Это приводит не только к дифференцированию скоростей, что имеет фундаментальное значение для выяснения реакционной способности адсорбированного водорода, различающегося по энергии адсорбции к никелю, но и позволяет варьировать восприимчивость катализатора к водороду, тем самым позволяя повысить селективность катализатора.

Таким образом, изучена активность нанесенного никелевого катализатора Ni/SiO<sub>2</sub> в реакции восстановления нитросоединений в водной и водно-спиртовой среде в условиях частичной контролируемой дезактивации сульфидом натрия. Экспериментально определено, что сульфид блокирует поверхностные атомы никеля в соотношении 3 атома S<sup>2-</sup> к 2 атомам Ni<sup>0</sup>, что подтверждает селективную адсорбцию яда на активных центрах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холодкова Н.В., Базанова И.Н., Гостикин В.П., Голубкова Г.В., Лукин М.В. // Журн. физ. химии. 2004. Т. 78. № 11. С. 1991.
2. Лукин М.В. Дис. ... канд. хим. наук: 02. 00.04. Иваново, 2001. 127 с.
3. Бесков В.С. Общая химическая технология: учебник для вузов. М., 2005. С. 51.
4. Сеттерфилд Ч. Практический курс гетерогенного катализа. М., 1984. С. 190.
5. Ertl G., Knozinger H., Schüth F., Weitkamp J. Handbook of Heterogeneous Catalysis. Weinheim, 1997. Vol. 3. P. 1263.
6. Bond G.C., Ertl G., Knozinger H., Weitkamp J. Handbook of Heterogeneous Catalysis. Weinheim, 1997. Vol. 2. P. 752.
7. Yasumura, J., Nakabayashi I. // Chem. Letters. 1972. N 4. P. 511 (<https://doi.org/10.1246/cl.1972.511>).
8. Petrov L., Kumbilieva K., Kirkov N. // Appl. Catalysis. 1990. Vol. 59. P. 31 ([https://doi.org/10.1016/S0166-9834\(00\)82185-5](https://doi.org/10.1016/S0166-9834(00)82185-5)).
9. Lefedova O.V., Gostikin V.P., Ulitin M.V. // Russ. J. Phys. Chem. 2001. Vol. 5. N 9. P. 1433.
10. Mahata N., Cunha A.F., Orfao J.J.M., Figueiredo J.L. // Applied Catalysis A: General. 2008. Vol. 351. N 2. P. 204 (<https://doi.org/10.1016/J.APcata.2008.09.015>).
11. Lianga C., Hana J., Shena K., Wanga L., Zhaoa D., Freemanb H.S. // Chemical Engineering Journal. 2010. Vol. 165. P. 709 (<https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2010.10.022>).
12. Shimizu K., Miyamoto Yu., Satsuma A. // J. Catalysis. 2010. Vol. 270. P. 86 (<https://doi.org/10.1016/J.JCAT.2009.12.009>).
13. Rizhi C., Yan D., Weihong X., Nanping X. // Chinese Journal of Chemical Engineering. 2007. Vol. 15. N 6. P. 884 ([https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(08\)60019-1](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(08)60019-1)).
14. Сокольский Д.В. Гидрирование в растворах. Алма-Ата, 1972. 486 с.
15. Afineevskii A.V., Prozorov D.A., Osadchaya T.Yu., Gordina N.E. // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2023. Vol. 59. N 1. P. 1 (<https://doi.org/10.31857/S0044185622700012>).
16. Прозоров Д.А., Афинеевский А.В., Князев А.В., Лукин М.В., Осадчая Т.Ю., Румянцев Р.Н. Каталитические свойства и дезактивация скелетного никеля в реакциях жидкофазной гидрогенизации. Казань, 2018. 316 с. ISBN 978-5-00118-185-9.
17. Kunin A.V., Ilyin A.A., Morozov L.N., Smirnov N.N., Nikiforova T.E., Prozorov D.A., Rumyantsev R.N., Afineevskiy A.V., Borisova O.A., Grishin I.S., Veres K.A., Kurnikova A.A., Gabrin V.A., Gordina N.E. // ChemChemTech. 2023. Vol. 66. N 7. P. 132-150 (<https://doi.org/10.6060/ivkkt.20236607.6849j>).
18. Черданцев Ю.П., Чернов И.П., Тюрин Ю.И. Методы исследования систем металл-водород. Томск, 2008. 286 с.
19. Afineevskii A.V., Prozorov D.A., Knyazev A.V., Osadchaya T.Y. // ChemistrySelect. 2020. Vol. 5. N 3. P. 1007 (<https://doi.org/10.1002/slct.201903608>).
20. Lukin M.V., Prozorov D.A., Ulitin M.V., Vdovin Yu.A. // Applied Catalysis A: General. 2001. T. 212. N 1. P. 17 ([https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(00\)00843-7](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(00)00843-7)).
22. Осадчая Т.Ю. Пат. РФ № 2604093 С1. 2016.
23. Андерсон Д. Структура металлических катализаторов. Новосибирск, 1978. 384 с.
24. Худорожков А.К. Дис. ... канд. хим. наук. Новосибирск, 2017. 121 с.
25. Langford J. I., Wilson A. J. C. // Applied Crystallography. 1978. T. 11. №. 2. С. 102 (<https://doi.org/10.1107/S0021889878012844>).
26. Bergeret G., Gallezot P. // Handbook of heterogeneous catalysis. 2008. T. 2. С. 738.
27. Prozorov D.A., Lukin M.V., Ulitin M.V. // ChemChemTech. 2010. T. 53. Вып. 2. С. 125.
28. Knapik A., Drelinkiewicz A., Szalaniec M., Makowski W., Waksmundzka-Góra A., Bukowska A., Bukowski W., Noworól J. // J. Mol. Catal. A: Chem. 2008. Vol. 279. N 1. P. 47 (<https://doi.org/10.1016/j.molcata.2007.09.018>).
29. Etayo P., Vidal-Ferran A. // Chem. Soc. Rev. 2013. Vol. 42. N 2. P. 728 (<https://doi.org/10.1039/C2CS35410A>).
30. Койфман О.И., Барбов А.В., Гостикин В.П., Комаров А.А., Лефедова О.В., Меркин А.А., Немцева М.П., Романенко Ю.Е., Улитин М.В., Шаронов Н.Ю. Теория и практика процессов жидкофазной гидрогенизации замещенных нитробензолов. М., 2016. 528 с.
31. Прозоров Д.А., Лукин М.В. // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. 2013. № 15. С. 168.

**Информация об авторах**

Татьяна Юрьевна Осадчая – ст. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории синтеза, исследований и испытания каталитических и адсорбционных систем для процессов переработки углеводородного сырья, ИГХТУ, канд. хим. наук (osadchayatyu@gmail.com);

Андрей Владимирович Афинеевский – ст. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории синтеза, исследований и испытания каталитических и адсорбционных систем для процессов переработки углеводородного сырья, ИГХТУ, канд. хим. наук (afineevskiy@mail.ru);

Дмитрий Алексеевич Прозоров – гл. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории синтеза, исследований и испытания каталитических и адсорбционных систем для процессов переработки углеводородного сырья, ИГХТУ, докт. хим. наук (prozorovda@mail.ru);

Кирилл Андреевич Никитин – мл. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории синтеза, исследований и испытания каталитических и адсорбционных систем для процессов переработки углеводородного сырья, ИГХТУ, канд. хим. наук (kirillnikitin09@gmail.com);

Дмитрий Владимирович Смирнов – науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории синтеза, исследований и испытания каталитических и адсорбционных систем для процессов переработки углеводородного сырья, ИГХТУ, канд. хим. наук (morgandvs37@gmail.com).

### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Соблюдение этических стандартов**

В данной работе отсутствуют исследования человека и животных.

Статья поступила в редакцию 10.05.2025;  
одобрена после рецензирования 16.06.2025;  
принята к публикации 25.06.2025.