

УДК 544.478.6, 544.476.2

КИНЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДЕЗАКТИВАЦИИ НАНЕСЕННОГО НИКЕЛЕВОГО КАТАЛИЗАТОРА СУЛЬФИДОМ НАТРИЯ

© 2024 г. Ю. Е. Романенко^a, *, А. В. Аффинеевский^a, Д. А. Прозоров^a, Н. Е. Гордина^a

^aФГБОУ ВО Ивановский государственный химико-технологический университет,
пр. Шереметевский, 7, Иваново, 153000 Россия

*e-mail: Romanenko@isuct.ru

Поступила в редакцию 23.08.2024 г.

После доработки 09.09.2024 г.

Принята к публикации 10.09.2024 г.

Изучена кинетика реакции жидкофазного гидрирования акрилата натрия. В качестве катализатора использовали Ni/SiO₂ с различным количеством нанесенного никеля, а также образцы с контролируемой частичной дезактивацией поверхности сульфид-ионом. Предложен метод для определения количества восстановленного металла на поверхности катализатора и количества каталитического яда, необходимого для дезактивирования активных центров. Измерены скорости реакции гидрирования, активность. Проведено моделирование кинетики, получены константы скорости гидрирования, адсорбции и десорбции водорода. Оценено количество активных центров, а также их соотношение с атомами металла, находящегося на поверхности катализатора.

Ключевые слова: нанесенный никелевый катализатор, каталитический яд, активные центры катализатора, блокирование активных центров

DOI: 10.31857/S0453881124030053, **EDN:** RVSJOA

ВВЕДЕНИЕ

Активность и селективность катализаторов жидкофазного гидрирования во многом определяются состоянием (энергией связи, количеством, распределением, доступностью и др.) адсорбированного водорода на поверхности [1–4]. В работах [5–7] предложено использование метода региональных скоростей для оценки реакционной способности адсорбированного водорода. Согласно этому методу, общая скорость реакции равна сумме скоростей на разных типах активных центров поверхности.

Исследование кинетики процесса при различных внешних условиях позволяет описать закономерности процессов гидрирования. Вместе с этим информация о доле активной поверхности металла-катализатора от общей поверхности дает возможность оценить реакционную способность водорода и предсказать поведение катализатора при изменении изученных внешних факторов. Для целенаправленного изменения количества адсорбированного водорода, смеще-

ния адсорбционного равновесия на поверхности катализатора и создания оптимальных каталитических систем с заданными параметрами активности и селективности авторы [1, 5] предложили метод, который предусматривает контролируемую частичную дезактивацию гетерогенного катализатора. Для его применения необходимо соблюдение ряда условий выбора дезактивирующего агента (каталитического яда), который:

- должен необратимо взаимодействовать с активными центрами катализатора, что позволит однозначно характеризовать поверхностные концентрации индивидуальных форм адсорбированного водорода;

- не должен существенно менять химический состав катализатора (его действие должно ограничиваться изменением числа и концентрации активных центров на поверхности);

- не должен влиять на кинетические параметры процесса гидрирования через изменение свойств растворителя.

Авторами работ [1, 4, 5, 8] был изучен скелетный никелевый катализатор, который обладает рядом недостатков для подобных исследований. Один из них состоит в том, что при дезактива-

Сокращения и обозначения: Ni/SiO₂ — никель, нанесенный на силикагель, РФЭС — рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, ЭДА — энергодисперсионный анализ.

ции каталитическим ядом количество активных центров может возрастать [8]. Этого можно избежать, используя нанесенные катализаторы. Достоинством использования нанесенных катализаторов для подобных исследований также является контроль процентного содержания нанесенного металла. Таким образом, можно сравнивать активные и частично дезактивированные катализаторы с сопоставимым количеством активных центров.

Целью настоящей работы было изучение кинетики жидкофазного гидрирования акрилата натрия и влияния каталитического яда на блокировку активных центров катализатора Ni/SiO_2 .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Катализатор

В качестве катализатора гидрирования были выбраны образцы Ni/SiO_2 с различным количеством нанесенного никеля. В работе были исследованы шесть катализаторов с разным содержанием нанесенного на силикагель никеля согласно [9]. В 15 мл водного раствора нитрата никеля с концентрациями 50.13, 37.17, 34.64, 20.97, 15.75 и 10.39 мас. % вносили 1 г силикагеля марки Л 5/40 мкм (SiO_2) и осуществляли его пропитку при перемешивании на магнитной мешалке с частотой 1 Гц в течение 4 ч при температуре 30°C. Пропитанный силикагель (носитель) отделяли от раствора фильтрованием на фильтре Шотта, сушили при 80°C в течение 2 ч и далее прокачивали при 470°C до прекращения выделения оксида азота (2 ч $\pm$ 30 мин). Перед проведением кинетического эксперимента катализатор восстанавливали в трубчатой печи при 470°C (скорость нагрева — 4°C/мин, выдержка при 470°C — 15 мин). Полученные образцы далее обозначены как Ni_X/SiO_2 , где X — массовое содержание Ni в катализаторе.

Частичная дезактивация катализатора

Одними из наиболее часто встречаемых каталитических ядов являются серосодержащие вещества [1, 10]. Поэтому в качестве каталитического яда был выбран сульфид натрия. Контролируемую дезактивацию катализатора выполняли по методике, разработанной ранее [5]. Для этого перед кинетическим опытом добавляли в реактор точно отмеренное количество 0.025 М раствора сульфида натрия: 0.1–0.3 мл на 100 мл жидкой фазы. Водородный показатель раствора соответствовал показателю реакционной среды.

Процесс дезактивации проходил в режиме титрования в атмосфере водорода при интенсивном перемешивании жидкой фазы.

Количество вводимого сульфида выбиралось так, чтобы снизить активность катализатора незначительно, но больше, чем составляет погрешность кинетического эксперимента (10–15%). Таким образом, для каждого катализатора было получено по четыре образца, обработанных разным количеством сульфида.

Кинетический эксперимент

Для изучения процесса гидрирования был выбран акрилат натрия. Производные акриловой кислоты удобно использовать в качестве модельных соединений, так как данное вещество взаимодействует с водородом в стехиометрии 1 : 1 без образования побочных и промежуточных продуктов, регистрируемых в жидкой фазе [11, 12]. Гидрирование проводили статическим методом в герметизированной системе с контролируемым поступлением газообразного водорода. Реактор объемом 400 мл термостатировали при 30°C. 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. Таким образом, были получены первичные экспериментальные данные — зависимость количества поглощенного водорода от времени реакции.

Физико-химические методы анализа

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 приходится на 5 мкм, а глубина формирования сигнала для ЭДА для силикагеля составляет тоже около 5 мкм, то с небольшим допущением можно считать, что полученные данные описывают состав всей гранулы нанесенного катализатора.

Состава и степень окисления элементов на поверхности частицы находили методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Фотоэлектронные спектры были зарегистрированы с предварительно дегазированных в вакууме образцов с помощью модернизированного электронного спектрометра ЭС-2403 (СКБ АП РАН, Россия), оснащенного анализатором энер-

гии PNOIBOS 100-5MCD (“Specs GmbH”, Германия) и рентгеновским источником $MgK_{\alpha}/AlK_{\alpha}$ XR-50 (“Specs GmbH”, Германия).

Для измерения величин удельной площади поверхности использовали низкотемпературную адсорбцию азота на приборе Сорби-MS (ЗАО “МЕТА”, Россия) по методу Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ).

Определение общего количества восстановленного металла осуществляли с помощью соляной кислоты. После восстановления катализатор в проточном реакторе продували аргоном со скоростью потока газа 20 ± 5 см³/мин при температуре 600°C для удаления сорбированного водорода [13]. Реактор охлаждали до 25°C. Далее во избежание контакта катализатора с воздухом его переносили под слоем воды в герметизируемый стеклянный реактор и термостатировали при 25°C. К реактору подключали систему измерительных бюреток для определения объема газа в системе, а также подачу аргона для вытеснения воздуха из системы. После вытеснения воздуха из системы выключали подачу аргона, вводили в систему термостатированный раствор HCl известного объема, включали перешивание и измеряли количество выделившегося газа. Метод основан на том, что при окислении восстановленного металла соляной кислотой будет выделяться молекулярный водород, объем которого можно измерить, и вычислить начальное количество восстановленного металла.

Полноту взаимодействия сульфида натрия с катализатором контролировали через измерение концентрации ионов S²⁻ в гидрогенизате на потенциометрической установке при темпе-

ратуре 298 К с помощью индикаторного ионоселективного электрода, в качестве которого применяли насыщенный хлорсеребряный электрод марки ЭВЛ 1МЗ. Изменения ЭДС электродной системы регистрировали с помощью измерительного преобразователя МУЛЬТИТЕСТ ИПЛ-311 (Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа и выбора наиболее подходящей кинетической модели необходимо знать количественное соотношение всех реактантов, в том числе количество активных центров поверхности. Существует достаточно много подходов к нахождению числа последних, однако в основном они ориентированы на измерение в газовой фазе [14–16] и существенно отличаются результатов, полученных в жидкой фазе. Так как основу активных центров в случае металлических нанесенных катализаторов гидрирования составляет восстановленный металл, его количество измеряли растворением в кислоте. Количество металла на поверхности находили по данным РФЭС. В качестве примера на рис. 1 приведен РФЭ-спектр образца Ni_{27.6}/SiO₂ с максимальным содержанием (27.6 мас. %) никеля.

В табл. 1 сведены данные по общему количеству нанесенного металла (никель во всех степенях окисления по данным ЭДА) в зависимости от концентрации использованного раствора нитрата никеля, а также общее содержание никеля на поверхности носителя (по данным РФЭС). Для каждого катализатора была выполнена серия экспериментов по гидрированию равных порций акрилата натрия на свежем образце

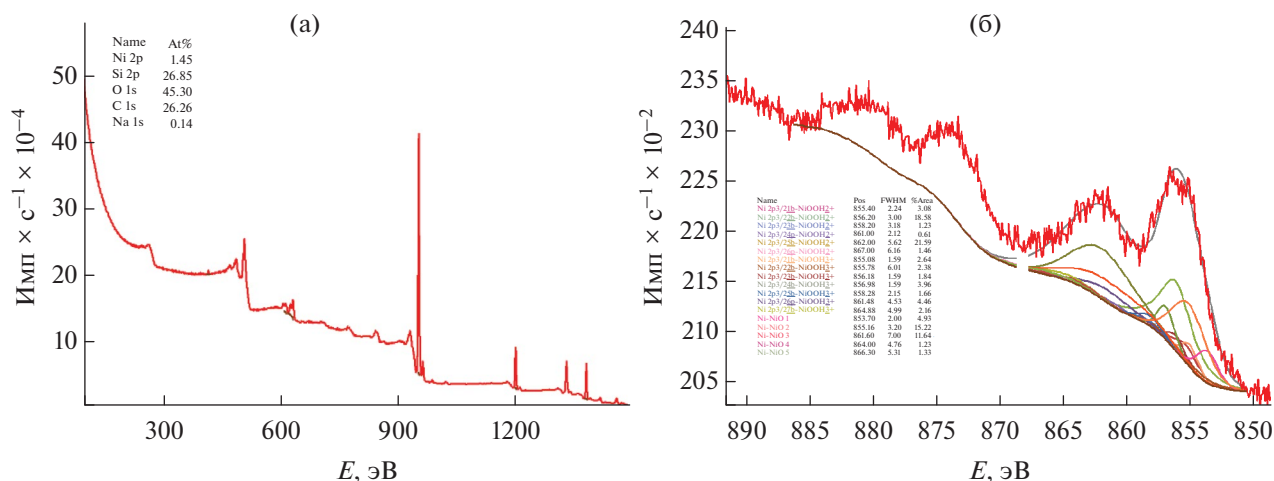


Рис. 1. Обзорный РФЭ-спектр (а) и РФЭ-спектр высокого разрешения подуровня Ni2p (б) образца Ni_{27.6}/SiO₂.

Таблица 1. Состав катализаторов Ni/SiO₂

Образец	Концентрация раствора Ni(NO ₃) ₂ , мас. %	Содержание Ni, мас. %			
		ЭДА ^а	HCl ^б	Ni2p ^в	Ni0 ^г
Ni _{27.6} /SiO ₂	50.13	27.59	11	5.44	1.63
Ni _{20.5} /SiO ₂	37.17	20.50	9	4.25	1.27
Ni _{18.8} /SiO ₂	34.64	18.75	7	3.59	1.08
Ni _{10.5} /SiO ₂	20.97	10.46	5	2.27	0.681
Ni _{9.1} /SiO ₂	15.75	9.09	4	1.88	0.566
Ni _{6.1} /SiO ₂	10.39	6.07	0.6	0.75	0.225

^аПо данным ЭДА (общее количество).
^бПо результатам растворения в соляной кислоте.
^вПо данным РФЭС все формы никеля.
^гПо данным РФЭС только восстановленные формы никеля.

и при различных степенях его отравления. На рис. 2 в качестве примера представлены результаты исследования каталитических свойств образца Ni_{27.6}/SiO₂ при различных количествах введенного сульфида натрия. На основании полученных экспериментальных данных были

рассчитаны значения активности катализаторов (A , см³H₂ мин⁻¹ гNi⁻¹) как скорость гидрирования в начальный момент времени. В работах [1, 10] был предложен способ оценки количества каталитического яда, которое полностью дезактивирует все активные центры

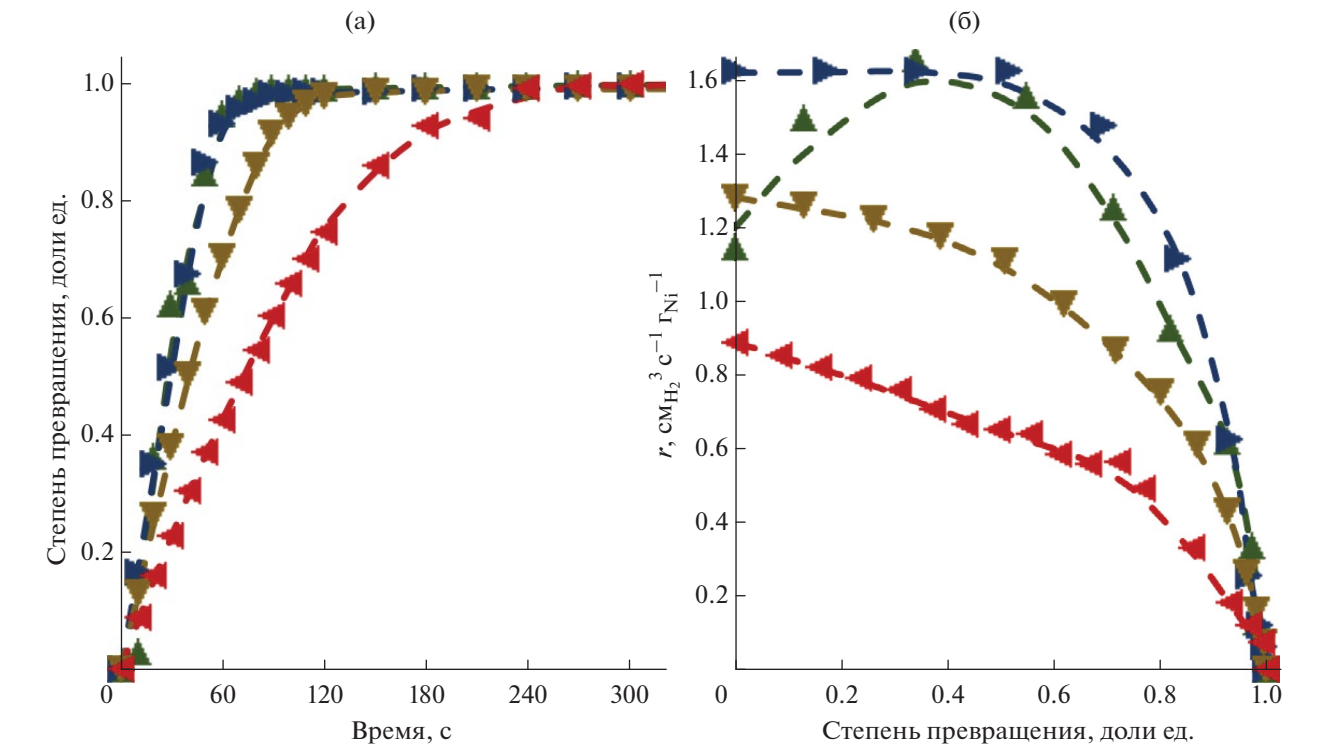


Рис. 2. Зависимости степени превращения от времени реакции (а) и скорости поглощения водорода из газовой фазы от степени его превращения (б) для образца катализатора Ni_{27.6}/SiO₂ с различным содержанием сульфида, ммоль_{Na₂S}/гNi: ▲ — 0, ▴ — 0.036, ▽ — 0.109, ▴ — 0.217.

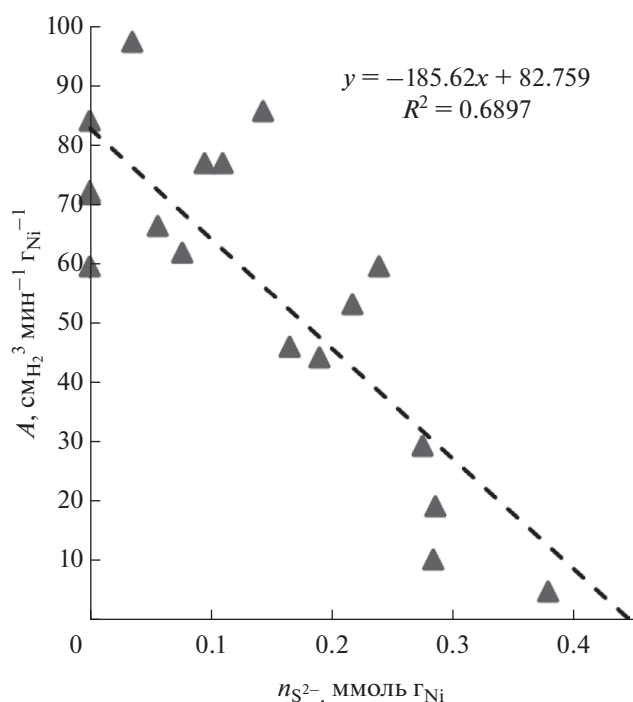


Рис. 3. Влияние количества добавленного сульфида на активность исследованных катализаторов.

катализатора. Для этого необходимо получить зависимость вида $A = f(n_{\text{кат.яд}})$, где $n_{\text{кат.яд}}$ — количество каталитического яда, приходящееся на один грамм металла, и экстраполировать ее на область, где активность принимает значение ноль. На рис. 3 приведено графическое отображение полученной зависимости для всех проведенных кинетических экспериментов.

На основании этих данных установлено, что для полной дезактивации всех активных центров необходимо ввести в систему 0.446 ммоль сульфида натрия на один грамм никеля (табл. 1, столбец 3). Отсюда следует, что один атом сульфида блокирует 2.3 ± 1.2 атома восстановленного никеля на поверхности катализатора (табл. 1, столбец 4), что в пределах погрешности соответствует стехиометрии: Ni–S–Ni. Однако точность такого метода слишком низкая ($R^2 = 0.69$). Моделирование кинетики позволит уточнить количество активных центров, которые блокируются одним атомом серы, а также определить константы скорости отдельных стадий.

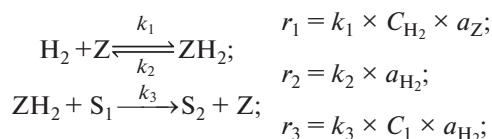
При моделировании кинетики гидрирования акрилата натрия были приняты следующие допущения:

— водород обратимо адсорбируется на активных центрах поверхности катализатора;

— за счет интенсивного перемешивания и поддержания постоянного давления (атмосферного) концентрация водорода в растворе поддерживается постоянной и равной растворимости при данных температуре и давлении;

— акрилат натрия вступает в реакцию из жидкой фазы, то есть реализуется механизм Ридила-Или.

Предлагаемая схема превращений:



где H_2 — растворенный водород; Z — свободные активные центры поверхности катализатора (занятые растворителем); ZH_2 — активные центры, занятые водородом; S_1 — исходный акрилат; S_2 — продукт реакции, пропионат; C_1 и C_{H_2} — концентрации акрилата и водорода соответственно, моль/л; a_{Z} и a_{H_2} — количество активных центров катализатора, занятых растворителем и водородом соответственно, моль/ Γ_{Ni} .

Общее количество активных центров a_{∞} (моль/ Γ_{Ni}) при введении сульфида уменьшается, что учитывается с помощью формулы материального баланса:

$$a_{\infty} - f \times n_{\text{S}} = a_{\text{H}_2} + a_{\text{Z}},$$

где n_{S} — количество введенного сульфида, моль; f — число активных центров, которые блокируются одним атомом серы.

В работе [17] было измерено количество реакционноспособного водорода на поверхности исследуемых образцов, которое составило 0.47 и 0.35 $\text{см}^3 \text{H}_2 / \Gamma_{\text{кат}}$ для катализаторов, содержащих 9 и 4 мас. % активного металла соответственно (табл. 1, столбец 4). По этим данным было найдено отношение количества водорода к массе нанесенного металла (табл. 1, столбец 3), равное $(7.61 \div 0.01) \times 10^{-5}$ моль $\text{H}_2 / \Gamma_{\text{Ni}}$, с помощью которого можно рассчитать a_{H_2} для каждого образца катализатора.

Так как в настоящей работе варьировали в том числе константу равновесия адсорбции водорода $K = k_1/k_2$, общее количество активных центров катализатора до травления было выражено из уравнения Ленгмюра:

$$a_{\infty} = a_{\text{H}_2} \times \left(1 + \frac{1}{K \times C_{\text{H}_2}} \right).$$

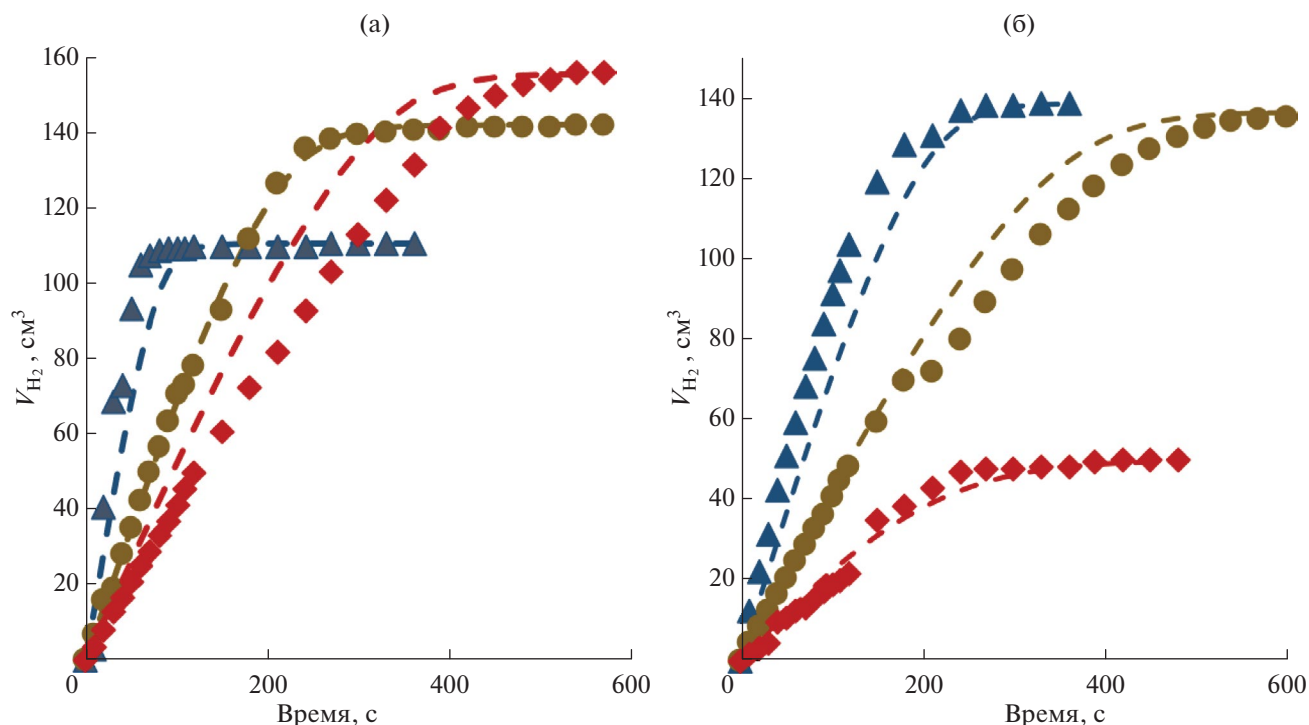


Рис. 4. Кинетические кривые поглощения водорода из газовой фазы для недеактивированных (а) и частично дезактивированных (б) катализаторов с содержанием никеля 27.6 (▲), 20.5 (•) и 9.1 мас. % (♦); точки — эксперимент, линии — расчет.

На первой стадии моделировали кинетику реакции гидрирования акрилата натрия на нанесенном никелевом катализаторе до введения сульфида. В качестве начальных приближений была взята константа скорости адсорбции водорода (k_1) для скелетного никеля [18], равная $0.03 \text{ м}^3 \text{ моль}^{-1} \text{ с}^{-1}$. Соответствие модельных расчетов экспериментальным данным оценивали путем нахождения среднего квадратического отклонения соответствующих величин. Результаты моделирования кинетики реакции гидрирования акрилата натрия в сравнении с экспериментом в присутствии катализаторов до и после травления приведены на рис. 4.

Наибольшую чувствительность модель показала к константе скорости адсорбции водорода $k_1 = 0.78 \pm 0.02 \text{ м}^3 \text{ моль}^{-1} \text{ с}^{-1}$, которая на порядок превышает аналогичную величину для скелетного никелевого катализатора ($0.03 \text{ м}^3 \text{ моль}^{-1} \text{ с}^{-1}$) из работы [18]. Это может свидетельствовать о большей доступности поверхности нанесенного металла по сравнению со скелетным никелем. Значение константы равновесия адсорбции водорода $K = k_1/k_2 = 4.0 \pm 0.4 \text{ м}^3/\text{моль}$ в пределах погрешности сопоставимо с литературными данными для скелетного никеля. Константа скорости гидрирования акрилата натрия составляет $k_3 = 0.072 \pm 0.005 \text{ кг}_{\text{Ni}} \text{ моль}^{-1} \text{ с}^{-1}$.

На второй стадии был изучен механизм травления катализатора. Предполагалось, что каждый атом серы блокирует f активных центров поверхности, снижая общее их количество (a_∞). На этом этапе при моделировании варьировали только величину f , а для констант скорости использовали значения, полученные на первом этапе. Результаты моделирования кинетики реакции гидрирования акрилата натрия в сравнении с экспериментом на катализаторах после травления приведены на рис. 4б. Рассчитанный критерий Фишера для степени значимости, равный 0.05, свидетельствует, что модель адекватно описывает имеющийся набор экспериментальных данных.

Наилучшая сходимость опытных и расчетных количеств поглощенного водорода была достигнута при $f = 4.07 \pm 0.08$, то есть в случае, когда 4 активных центра поверхности катализатора блокируются одной молекулой введенного сульфида. Учитывая, что, согласно полученному выше соотношению, ~ 2 поверхностных атома восстановленного никеля блокируются одним введенным атомом серы, можно предположить, что каждый поверхностный атом никеля представляет собой два активных центра адсорбции водорода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование кинетики гидрирования акрилата натрия на Ni/SiO₂ с различным содержанием никеля в условиях контролируемой частичной дезактивации. По снижению активности образцов определено число восстановленных атомов никеля на поверхности катализатора, блокируемых одним атомом серы, которое составило 2.3 ± 1.2 .

В результате проведенного кинетического моделирования получены константы скорости отдельных стадий: адсорбции водорода ($k_1 = 0.78 \pm 0.02 \text{ м}^3 \text{ моль}^{-1} \text{ с}^{-1}$) и гидрирования акрилата натрия ($k_3 = 0.072 \pm 0.005 \text{ кг}_{\text{Ni}} \text{ моль}^{-1} \text{ с}^{-1}$), а также константа равновесия адсорбции водорода ($K = 4.0 \pm 0.4 \text{ м}^3/\text{моль}$). Сравнение найденной константы скорости адсорбции водорода с таковой для скелетного катализатора позволило сделать вывод, что адсорбция водорода на нанесенном катализаторе протекает существенно быстрее, чем на массивном. Эти данные в дальнейшем могут быть использованы при описании более сложных процессов каталитического гидрирования на поверхности нанесенных никелевых катализаторов.

Также при моделировании определено, что один атом серы блокирует 4.07 ± 0.08 активных центра, способных адсорбировать водород. Сделано предположение о том, что поверхностные атомы восстановленного никеля могут содержать до двух активных центров по отношению к водороду.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-23-00362, <https://rscf.ru/project/24-23-00362/>

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Afineevskii A.V., Prozorov D.A., Knyazev A.V., Osadchaya T.Y. // ChemistrySelect. 2020. V. 5. № 3. P. 1007. DOI: 10.1002/slct.201903608
2. Singh U.K., Vannice M.A. // Appl. Catal. A: Gen. 2001. V. 213. № 1. P. 1. DOI: 10.1016/S0926-860X(00)00885-1
3. Herron J.A., Tonelli S., Mavrikakis M. // Surf. Sci. 2012. V. 606. № 21–22. P. 1670. DOI: 10.1016/j.susc.2012.07.003
4. Ceyer S.T. // Acc. Chem. Res. 2001. V. 34. № 9. P. 737. DOI: 10.1021/ar970030f
5. Прозоров Д.А., Лукин М.В., Улитин М.В. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2010. Т. 53. Вып. 2. С. 125.
6. Li J., Liu G., Long X., Gao G., Wu J., Li F. // J. Catal. 2017. V. 355. P. 53. DOI: 10.1016/j.jcat.2017.09.007
7. Teschner D., Révay Z., Borsodi J., Hävecker M., Knop-Gericke A., Schlögl R., Milroy D., Jackson S.D., Torres D., Sautet P. // Angew. Chem. 2008. V. 120. № 48. P. 9414. DOI: 10.1002/ange.200802134
8. Afineevskii A.V., Prozorov D.A., Osadchaya T.Y., Gordina N.E. // Fine Chem. Technol. 2023. V. 18. № 4. P. 341. DOI: 10.32362/2410-6593-2023-18-4-341-354
9. Патент РФ 2604093 C1, 2016.
10. Bartholomew C.H. // Appl. Catal. A: Gen. 2001. V. 212. № 1–2. P. 17. DOI: 10.1016/S0926-860X(00)00843-7
11. Knapik A., Drelinkiewicz A., Szalaniec M., Makowski W., Waksmundzka-Góra A., Bukowska A., Bukowski W., Noworól J. // J. Mol. Catal. A: Chem. 2008. V. 279. № 1. P. 47. DOI: 10.1016/j.molcata.2007.09.018
12. Etayo P., Vidal-Ferran A. // Chem. Soc. Rev. 2013. V. 42. № 2. P. 728. DOI: 10.1039/C2CS35410A
13. Boudjahem A.G., Monteverdi S., Mercy M., Ghanbaja D., Bettahar M.M. // Catal. Lett. 2002. V. 84. P. 115. DOI: 10.1023/A:1021093005287
14. Vogt C., Weckhuysen B.M. // Nature Rev. Chem. 2022. V. 6. № 2. P. 89. DOI: 10.1038/s41570-021-00340-y
15. Samokhvalov A., Tatarchuk B.J. // Catal. Rev. 2010. V. 52. № 3. P. 381. DOI: 10.1080/01614940.2010.498749
16. Nørskov J.K., Bligaard T., Hvolbæk B., Abild-Pedersen F., Chorkendorff I., Christensen C.H. // Chem. Soc. Rev. 2008. V. 37. № 10. P. 2163. DOI: 10.1039/b800260f
17. Сухачев Я.П., Прозоров Д.А., Афиневский А.В., Челышева М.Д., Никитин К.А., Жилин М.А. // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. 2018. № 3. С. 89.
18. Меркин А.А., Романенко Ю.Е., Лефедова О.В. // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. № 8. С. 93. DOI: 10.7868/S0044453714080263

Kinetic Description of Deactivation of a Supplied Nickel Catalyst by Sodium Sulphide

Yu. E. Romanenko^{1, *}, A. V. Afineevskii¹, D. A. Prozorov¹, N. E. Gordina¹

¹*Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, 153000 Russia*

**e-mail: Romanenko@isuct.ru*

The kinetics of reactions of liquid-phase hydrogenation of sodium acrylate on catalysts has been studied. Ni/SiO₂ with different amounts of deposited nickel were used as a catalyst, as well as samples with controlled partial deactivation of the surface by sulfide ion. Approaches to determining the amount of reduced metal on the catalyst surface and the amount of catalytic poison required to deactivate active centers are shown. Hydrogenation reaction rates and activity were measured. Kinetics were modeled, and rate constants of hydrogenation, adsorption, and desorption of hydrogen were obtained. The number of active centers and their ratio to metal atoms located on the catalyst surface were estimated.

Keywords: Supported nickel catalyst, catalytic poison, active centers of the catalyst, blocking of active centers

FUNDING

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-23-00362, <https://rscf.ru/en/project/24-23-00362/>.