

ЭЛЕКТРОХИМИЯ. ГЕНЕРАЦИЯ И АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ
ИЗ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

УДК 544.653.3544.653.1661.53546.173351.778.34

СРАВНЕНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Pt- и Co-КАТОДОВ
В РЕАКЦИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НИТРИТОВ ДО АММИАКА

© 2025 г. И. И. Кузнецова^а, О. К. Лебедева^а, Д. Ю. Кульгин^а, Л. М. Кустов^{а, б, *}

^аМосковский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Химический факультет,
119991, Москва, Россия

^бИнститут органической химии им. Н. Д. Зелинского Российской академии наук,
119991, Москва, Россия

* e-mail: lmkustov@mail.ru

Поступила в редакцию 29.07.2024 г.

После доработки 29.07.2024 г.

Принята к публикации 12.08.2024 г.

Исследована электрохимическая реакция восстановления нитритов ($\text{NO}_2\text{-RR}$) в нейтральном водном электролите, имеющая важное применение, как для будущих процессов синтеза аммиака, так и для эффективной очистки сточных и сельскохозяйственных сбросов. Проведено сравнение каталитической активности (получены результаты выхода по току (Фарадеевской эффективности) и скорости образования аммиака) для благородного (платина) и неблагородного (кобальт) металлов. Электродами-катализаторами служили металлические поликристаллические платина и кобальт. Поверхность катализаторов была проанализирована при помощи сканирующей и оптической микроскопии. Метод потенциодинамических кривых служил для предварительного выявления потенциала синтеза аммиака и оценки плотности тока синтеза. Были получены значения выхода по току (Фарадеевская эффективность, FE) и скорость образования аммиака при выбранных пяти значениях плотностей тока. Было обнаружено, что более эффективным является кобальтовый катод ($\text{FE} \approx 99\%$, скорость образования (NH_3) = 2.4 мкмоль $\text{ч}^{-1} \text{см}^{-2}$), что превышает значения для платинового катода ($\text{FE} = 88.1\%$, скорость образования (NH_3) = 0.4 мкмоль $\text{ч}^{-1} \text{см}^{-2}$). Была определена электрохимически активная поверхность рабочих электродов-катализаторов. Объяснение такой активности катализаторов дано согласно результатам работы, которые демонстрируют, что катод из неблагородного металла может быть более эффективным для $\text{NO}_2\text{-RR}$, чем платиновый катод.

Ключевые слова: электрокатализ, восстановление нитритов, платиновый катализатор, кобальтовый катализатор, экологическая химия

DOI: 10.31857/S0044453725020205, EDN: DCWCKT

ВВЕДЕНИЕ

Концепция “зеленого” водорода привлекает внимание в качестве перспективного решения для повышения энергетической и экологической безопасности за счет декарбонизации. В качестве носителей для хранения и транспортировки водорода могут быть использованы жидкие органические носители водорода (ЛОНС), аммиак и жидкий/газообразный водород [1, 2]. Несмотря на очевидные недостатки аммиака (токсичность, трудности выделения водорода, низкие температуры хранения) он на настоящее время рассматривается как наиболее перспективный кандидат из-за высокого содержания водорода, развитой структуры транспортировки и хранения, его можно использовать как прямое топливо для сгорания и в топливных

элементах [1]. В получении “загруженных” жидких носителей водорода (ЛОНС и NH_3) ключевую роль играет электровосстановление, поскольку происходит при температурах, близких к комнатной, не требует давления и источником водорода в конечном итоге является вода [2–4].

Для получения аммиака электровосстановлением в качестве прекурсоров могут выступать азот (NRR) [4], оксиды азота ($\text{NO}_x\text{-RR}$) [5], нитриты ($\text{NO}_2\text{-RR}$) и нитраты ($\text{NO}_3\text{-RR}$) [6–10]. Нитрит дешевле нитрата почти в три раза, а число электронов для восстановления до аммиака меньше, что делает нитрит перспективным прекурсором. Нитрит является устойчивым промежуточным продуктом электровосстановления нитрата. Сравнение выхода по току (Фарадеевской эффективности, FE) для нитрита и аммиака

в NO_2^- -RR проведено в работах [6, 7, 10]. Сравнение катализаторов общей формулы M-N-C для четырнадцати 3d-, 4d-, 5d- и f-металлов показало, что самой низкой FE для получения аммиака характеризуются катализаторы на основе родия и рутения. На всех катализаторах при выбранных потенциалах наблюдаются оба продукта [6]. Установлены корреляции между активностью восстановления NO_2^- и селективностью восстановления NO_3^- до NH_3 [6]. В работе [7] исследованы NO_3^- -RR и NO_2^- -RR на нано-кубах Cu_2O . Для NO_3^- -RR максимальное значение FE (для NH_3) наблюдается при потенциале -0.3 В (ОВЭ). При всех потенциалах зафиксировано образование нитрита, выход которого возрастает при сдвиге потенциала в анодную область. Для NO_2^- -RR при всех значениях потенциала FE для аммиака примерно одинакова (85–90%). В работе [11] на Pt/Pt показано сходное электрохимическое поведение анионов NO_3^- и NO_2^- , и наблюдалось увеличение скорости электровосстановления анионов NO_3^- при переходе от Pt и Pd к Rh. При приближении к полному покрытию поверхности водородом на платине наблюдается пассивация катодных процессов, одной из причин которой может быть изменение лимитирующей стадии процесса: переход от лимитирующей стадии восстановления к медленной стадии адсорбции.

Процесс электровосстановления включает в себя промежуточные стадии переноса протона/электрона, поэтому для контроля селективности по отношению к целевому продукту необходимы эффективные катализаторы. Поиск таких катализаторов для NO_2^- -RR активно ведется в области молекулярно-дисперсных электрокатализаторов (МДЭ) на основе фталацианинов металлов [10], одноатомных сплавов (Single-atom alloys SAAs) [12–19], катализаторов на основе молибдена [20, 21], сульфида кобальта [22], оксида никеля [23]. Реакцию $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_3$ схематично можно представить как последовательность быстрых превращений ($\text{NO}_2^- \rightarrow * \text{NO}_2 \rightarrow * \text{NOOH} \rightarrow * \text{NO}$) и скорость-определяющей стадии $* \text{NO} \rightarrow * \text{NHO}$ с дальнейшим получением аммиака [11, 12]. Все катализаторы демонстрируют высокую FE (более 90%) и скорость образования аммиака. Роль катализаторов состоит в промотировании скорость-определяющей стадии, способствуя в целом энергетике реакции $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_3$, и в преодолении ограничений, связанных с реакцией выделения водорода [10, 16, 22, 23].

Поликристаллические платиновые катализаторы исследовали в электровосстановлении нитратов/нитритов в кислой среде [24, 25]. Восстановление на платине происходит с медленной скоростью и сильно зависит от присутствия на поверхности других анионов и водорода [11, 24]. Исследования в нейтральной и щелочной среде на платине не

носят систематического характера [11]. Катализаторы на основе кобальта демонстрируют умеренную FE для NH_3 в реакции NO_3^- -RR [6, 9, 26], но почти 100% в реакции NO_2^- -RR [6].

Другая стратегия повышения эффективности NO_2^- -RR состоит в использовании комбинированного магнито-электрокаталитического метода, использующего β -MnPc со спиновым возбуждением в магнитном поле напряженностью 95 мТл [27]. При действии магнитного поля скорость образования аммиака возрастает почти в два раза.

Целью работы было сравнение каталитической активности (FE и скорости образования аммиака) поликристаллических благородного (платина) и неблагородного (кобальт) металлов в NO_2^- -RR в нейтральной среде.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и реактивы

Нитрит натрия (NaNO_2), сульфат натрия (Na_2SO_4 , “х.ч.”) использовали без дополнительной очистки. Во всех экспериментах использовалась дистиллированная вода.

Стандартная трехэлектродная ячейка с разделенными пространствами применялась (объем основной камеры был 60 мл) для всех электрохимических экспериментов. Электродом сравнения служил насыщенный хлорсеребряный электрод (Ag/AgCl), значения которого пересчитывались относительно обратимого водородного электрода (ОВЭ), приводимые в этой работе; вспомогательным электродом служила платиновая проволока. В начале каждого измерения электролит продувался особо чистым аргоном в течение 40 мин.

Рабочие электроды-катализаторы: отоженная в пламени газо-воздушной горелки (для устранения следов электрохимического платинирования) платиновая пластина с геометрической площадью поверхности 2 см^2 – “гладкий” платиновый катод; кобальтовый стержень, предварительно подвергнутый грубой механической полировке абразивом с геометрической площадью поверхности 0.6 см^2 – кобальтовый катод.

Методы и приборы

Для получения снимков методом сканирующей электронной микроскопии был использован сканирующий электронный микроскоп, оснащенный анализатором энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ZEISS LEO EVO 50XVP, Zeiss AG, Jena, Germany).

Для получения оптических снимков использовали световой оптический микроскоп (ZEISS Axio Vert.A1, Zeiss AG, Jena, Germany).

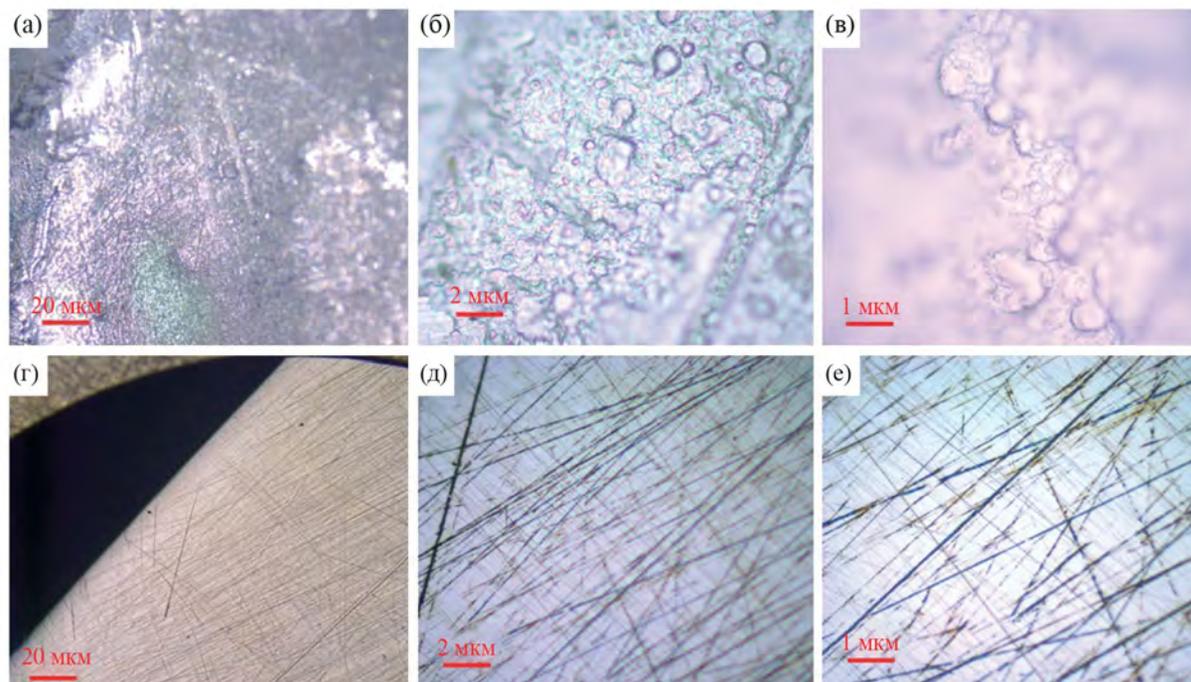


Рис. 1. Оптические снимки поверхности платинового (а–с) и кобальтового (г–е) рабочих электродов при различных увеличениях.

Для всех электрохимических измерений использовали высокопроизводительный потенциостат (Autolab PGSTAT302N, Metrohm, Switzerland).

Для анализа полученного аммиака использовался широко применяемый аналитический индофенольный метод, спектры были записаны при помощи спектрофотометра (Shimadzu UV-3600 Plus, Shimadzu, Japan).

Выход по току или Фарадеевская эффективность (FE), измерение электрохимически активной поверхности, а также скорость образования аммиака были получены по методикам и рассчитаны по формулам, приведенным в предыдущих недавних работах авторов [9, 26].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характеризация образцов электродов-катализаторов

На рис. 1 представлены снимки, полученные методом оптической микроскопии, образцов платинового и кобальтового электрода. Рис. 1а и г показывают общую морфологию поверхности при увеличении в 50 раз для платинового и кобальтового электрода, соответственно. При повышении увеличения в 10 раз, т.е. 500 раз (рис. 1б, д) становится заметной разница в шероховатости поверхности: для платинового образца это сложная морфология с выступами и впадинами микронного

размера, а для кобальтового образца – царапины от грубой обработки. То есть, несмотря на визуально “гладкую” морфологию поверхности, электроды не являются полированными образцами и обладают развитой поверхностью, необходимой для активных катализаторов. Рис. 1в, е – это снимки при увеличении 1000 крат, которые довольно сложно сфокусировать для оптического микроскопа, т.е. это предел возможностей оптической микроскопии, приведены для уточнения предыдущей серии.

Снимки, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, показаны на рис. 2 и являются продолжением увеличения по отношению к оптическим снимкам (рис. 1). Хорошо заметно отсутствие наноструктурных образований, подтверждающее формально “гладкую” морфологию поверхности. Таким образом, все образцы не являются “нанокатализаторами”, т.е. вклад наноструктур в активность катализаторов отсутствует и не играет определяющей роли в эффективности исследованной электрокаталитической реакции.

Электрокаталитическая реакция восстановления нитрита при постоянном потенциале

Предварительно были получены потенциодинамические кривые на платиновом рабочем электроде (рис. 3а). Катодный пик при $E = 0.5$ В

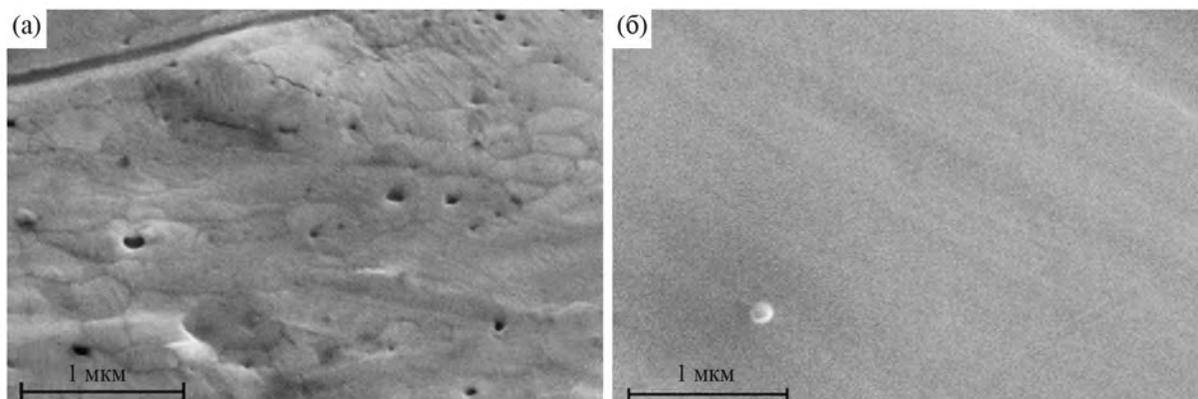


Рис. 2. Снимки сканирующей электронной микроскопии поверхности платинового (а) и кобальтового (б) рабочих электродов.

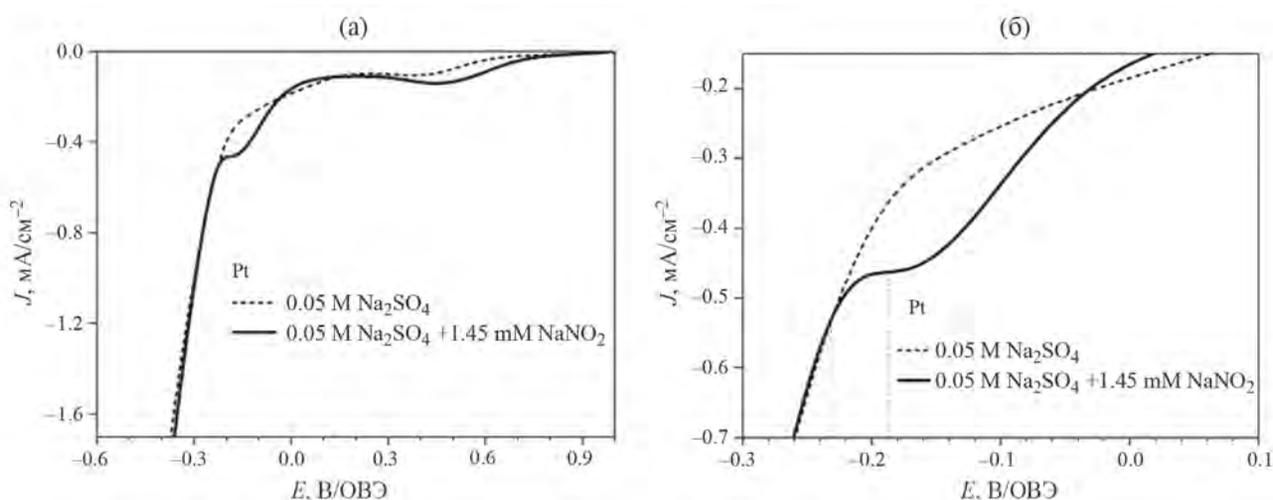


Рис. 3. Потенциодинамические кривые, полученные для платинового электрода при скорости развертки потенциала 50 мВ с^{-1} в фоновом нейтральном электролите в отсутствие и в присутствии нитрита (а) и увеличенный фрагмент с указанием выбранных значений потенциала (б).

соответствует десорбции кислородного слоя, является типичным и характерным для платинового электрода. Катодный пик при $E = -0.16 \text{ В}$ соответствует, как предполагается, реакции восстановления нитрит-ионов, и он отсутствует на фоновой кривой. Для электролиза при постоянном потенциале были выбраны (рис. 3б) два значения: $E = -0.185 \text{ В}$ (на гребне пика) и $E = -0.235 \text{ В}$ (немного сдвинут в катодную область).

По результатам электролиза (в течение 1 ч) были получены высокие значения Фарадеевской эффективности 96% ($E = -0.185 \text{ В}$) и 65.7% ($E = -0.235 \text{ В}$). При этом стационарные значения плотностей тока весьма малы (-0.062 и $-0.120 \text{ мА см}^{-2}$) и следовательно и выходы аммиака должны быть очень незначительными. Дальнейшая задача

состояла в поиске способа увеличения выхода, что предполагалось достичь электролизом при постоянном токе.

Электрокаталитическая реакция восстановления нитрита при постоянном токе

Синтез был проведен при постоянном токе, используя двухэлектродную схему электрохимической ячейки. Были установлены значения плотности катодного тока в интервале от -0.1 до -0.5 мА см^{-2} с шагом $0.1\text{--}0.2 \text{ мА}$. Каждое измерение проводилось в течение 1 ч, после чего были определены количества полученного NH_3 и были рассчитаны значения Фарадеевской эффективности и скорости образования аммиака.

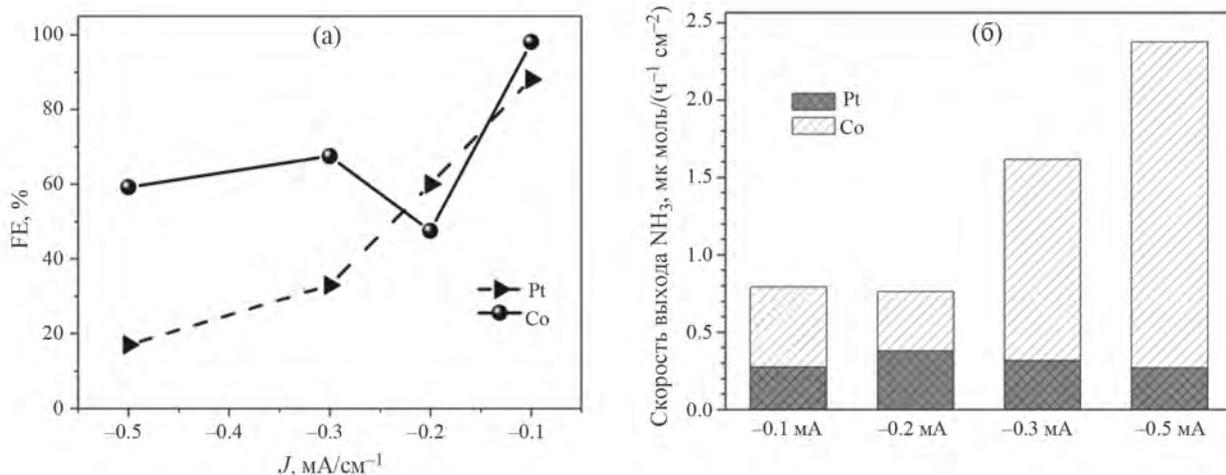


Рис. 4. Фарадеевская эффективность (а) и скорость выхода по NH_3 (б) при различных плотностях тока рабочего электрода.

Значения FE представлены на рис. 4а. Для платинового катода FE монотонно убывает с увеличением плотности катодного тока. Для кобальтового катода график имеет минимум (для $J = -0.2 \text{ mA cm}^{-2}$), и в целом снижение не столь велико, как для платинового электрода.

Другой важной характеристикой эффективности катализатора является значение скорости образования целевого продукта, т.е. NH_3 . Результаты приведены на рис. 4б. Самая высокая скорость образования продукта наблюдается для кобальтового катализатора при наибольшей исследованной плотности тока $J = -0.5 \text{ mA cm}^{-2}$. Тем не менее высокая FE для обоих образцов катализаторов, напротив, достигнута при наименьшей плотности тока $J = -0.1 \text{ mA cm}^{-2}$. Это свидетельствует о том, что оптимальное значение плотности тока находится скорее в середине исследованного интервала, чем на его границах. Как видно, платиновый катод-катализатор показывает более низкую активность по сравнению с катодом-катализатором из неблагородного металла, т.е. кобальта. Такой неожиданный на первый взгляд результат имеет естественное объяснение, представленное в завершающем разделе.

Измерение электрохимически активной поверхности

Электрохимическая емкость двойного электрического слоя (Cdl) является современным и достаточно эффективным способом для оценки площади электрохимически активной поверхности электродов-катализаторов (рис. 5а). Для исследованных электродов-катализаторов были получены потенциодинамические кривые при скоростях развертки потенциалов от 10 до 100 mV s^{-1} , которые были

записаны в области двойного электрического слоя для каждого образца, как показано на рис. 5б и в. Далее, для получения значений Cdl на рис. 5а был построен график зависимости средней плотности тока от скорости развертки потенциалов. Значения емкости двойного слоя для платинового и кобальтового катодов показаны на рис. 5а.

Платиновый электрод-катализатор обладает большей Cdl, что означает, что данный образец содержит наибольшее количество доступных каталитических центров. Однако, при этом, можно предположить, что эти каталитические центры доступны не только для реагентов исследованной реакции, но и для других побочных процессов, например выделения молекулярного азота, разряда водорода и особенно для адсорбции водорода. Следовательно, несмотря на более низкое значение Cdl для кобальтового катализатора, его селективность в исследованной реакции значительно выше, что подтверждается данными EF, рассмотренными выше.

Объяснение полученных результатов и выводы

Платиновый катод-катализатор показывает более низкую активность по отношению к катоду-катализатору из неблагородного металла (особенно в отношении значений скорости образования аммиака), т.е. к кобальтовому, что является следствием высокой адсорбционной способности платины по отношению к водороду. Согласно классическому исследованию [11], для платинового катода характерным является пассивация реакции восстановления нитратов и нитритов вследствие сильного связывания адсорбированного монослоя водорода, который блокирует активные центры, отвечающие за адсорбцию нитрит-ионов, как в щелочной, так и особенно

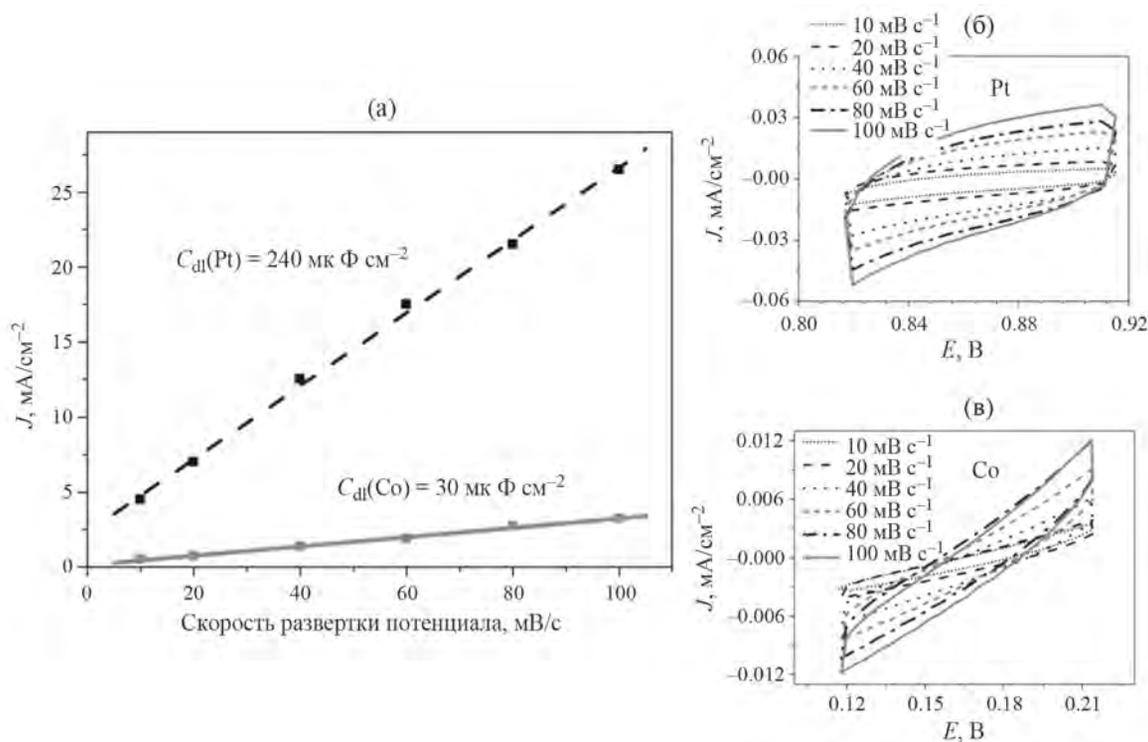


Рис. 5. Измерение электрохимически активной поверхности: емкости двойного электрического слоя (а), циклические потенциодинамические кривые при различных скоростях развертки для вычисления емкости двойного электрического слоя платинового (б) и кобальтового (в) рабочих электродов.

в кислой среде, и, следовательно, резко снижается эффективность целевой реакции. То есть, несмотря на значительно большую электрохимически активную поверхность, которая измеряется в “дегазированной” области – в двойном электрическом слое, поверхность платинового электрода-катализатора блокируется в области катодных потенциалов адсорбированным водородом и, таким образом, электрохимически активная поверхность для реакции NO_2^- -RR значительно уменьшается. Напротив, кобальтовый электрод-катализатор не подвергается столь сильной пассивации адсорбированным водородом и сохраняет высокие значения электрохимически активной поверхности и при высоких плотностях катодного тока, что выражается в значительно высоких (по сравнению с платиной) значениях выхода аммиака, т.е. электрод-катализатор из неблагородного металла (кобальта) оказывается, в конечном итоге, не только более эффективным, но и значительно более дешевым для экологически-чистой реакции энергетики будущего – электрокаталитической реакции восстановления нитритов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект

№ 23-73-30007) и при финансовой поддержке Проекта-госзадания № АААА-А21-121011590083-9.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе исследования на человеке или животных не проводились.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Makepeace J.W., He T., Weidenthaler C. et al.* // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2019. V. 44. P. 7746. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.144>
2. *John J., MacFarlane D.R., Simonov A.N.* // *Nat. Catal.* 2023. V. 6. P. 1125. <https://doi.org/10.1038/s41929-023-01060-w>
3. *Lebedeva O., Kultin D., Kalenchuk A., Kustov L.* // *Curr. Opin. Electrochem.* 2023. V. 38. P. 101207. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2022.101207>
4. *Imamura K., Kubota J.* // *Sustainable Energy Fuels*. 2019. V. 3. P. 1406. <https://doi.org/10.1039/C9SE00049F>

5. *Shao J., Jing H., Wei P. et al.* // *Nat. Energy*. 2023. V. 8. P. 1273. <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01386-6>
6. *Murphy E., Liu Y., Matanovic I. et al.* // *Nat. Commun.* 2023. V. 14. P. 4554. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40174-4>
7. *Bai L., Franco F., Timoshenko J. et al.* // *J. Am. Chem. Soc.* 2024. V. 146. P. 9665. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c13288>
8. *Jiang Z., Wang Y., Lin Z. et al.* // *Energy Environ. Sci.* 2023. V. 16. P. 2239. <https://doi.org/10.1039/D2EE03502B>
9. *Kuznetsova I., Lebedeva O., Kultin D. et al.* // *Int. J. Mol. Sci.* 2024. V. 25. P. 7089. <https://doi.org/10.3390/ijms25137089>
10. *Jiang Z., Wang Y., Lin Z. et al.* // *Energy Environ. Sci.* 2023. V. 16. P. 2239. <https://doi.org/10.1039/D2EE03502B>
11. *Petrii O.A., Safonova T.Ya.* // *J. Electroanal. Chem.* 1992. V. 331. P. 897. [https://doi.org/10.1016/0022-0728\(92\)85013-S](https://doi.org/10.1016/0022-0728(92)85013-S)
12. *Xiang J., Qiang C., Shang S. et al.* // *Adv. Funct. Materials*. 2024. P. 2401941. <https://doi.org/10.1002/adfm.202401941>
13. *Zhao H., Xiang J., Sun Z. et al.* // *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2024. V. 12. P. 2783. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c07388>
14. *Wang F., Xiang J., Zhang G. et al.* // *Nano Res.* 2024. V. 17. P. 3660. <https://doi.org/10.1007/s12274-023-6261-2>
15. *Wang F., Zhao H., Zhang G. et al.* // *Adv. Funct. Materials*. 2024. V. 34. P. 2308072. <https://doi.org/10.1002/adfm.202308072>
16. *Wang F., Shang S., Sun Z. et al.* // *Chem. Eng. J.* 2024. V. 489. P. 151410. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151410>
17. *Xiang J., Zhao H., Chen K. et al.* // *J. Colloid Interface Sci.* 2024. V. 653. P. 390. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.09.095>
18. *Xiang J., Zhao H., Chen K. et al.* // *Ibid.* 2024. V. 659. P. 432. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.01.013>
19. *Wan Y., Du W., Chen K. et al.* // *Ibid.* 2023. V. 652. P. 2180. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.09.071>
20. *Wu T., Zhang F., Wang J. et al.* // *Dalton Trans.* 2024. V. 53. P. 877. <https://doi.org/10.1039/D3DT03808D>
21. *Li Y., Ouyang L., Chen J. et al.* // *J. Colloid Interface Sci.* 2024. V. 663. P. 405. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.02.153>
22. *Qu Y., Guo Y., Chu K.* // *Inorg. Chem.* 2024. V. 63. P. 78. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.3c04194>
23. *Zhang Y., Wan Y., Liu X. et al.* // *iScience*. 2023. V. 26. P. 107944. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107944>
24. *Dima G.E., De Vooy A.C.A., Koper M.T.M.* // *J. Electroanal. Chem.* 2003. V. 554–555. P. 15. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(02\)01443-2](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(02)01443-2)
25. *De Groot M.T., Koper M.T.M.* // *J. Electroanal. Chem.* 2004. V. 562. P. 81. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2003.08.011>
26. *Lebedeva O., Zakharov V., Kuznetsova I. et al.* // *Chem. – Eur. J.* 2024. V. 30. P. e202402075. <https://doi.org/10.1002/chem.202402075>
27. *Adalder A., Mitra K., Barman N. et al.* // *ChemRxiv*. 2024. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2024-v8chs>

COMPARISON OF THE CATALYTIC PROPERTIES OF Pt AND Co CATHODES FOR THE NITRITE REDUCTION REACTION TO AMMONIA

I. I. Kuznetsova^a, O. K. Lebedeva^a, D. Yu. Kultin^a, and L. M. Kustov^{a, b, *}

^a*M. V. Lomonosov Moscow State University, Department of Chemistry, Moscow, 119991 Russia*

^b*N. D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: lmkustov@mail.ru*

Abstract. The electrochemical reaction reduction of nitrites (NO₂-RR) in a neutral aqueous electrolyte is studied, which has important applications both for future ammonia synthesis processes and for effective wastewater and agricultural wastewater treatment. The catalytic activity is compared (the results of the Faradaic efficiency and the yield rate of ammonia are obtained) for noble (platinum) and non-noble (cobalt) metals. Metallic polycrystalline platinum and cobalt serve as electrocatalyst. The surface of the catalysts is analyzed using SEM and light microscopy. The method of linear voltammetry is used to preliminarily identify the potential of ammonia synthesis and estimate the synthesis current density. The values of Faradaic efficiency (FE) and the yield rate of ammonia release are obtained for the five selected

values of current densities (J). It is found that the cobalt cathode is more efficient (FE \approx 99%, yield rate (NH₃) = 2.4 mmol h⁻¹ cm⁻²), which exceeds the values for the platinum cathode (FE = 88.1%, yield rate (NH₃) = 0.4 mmol h⁻¹ cm⁻²). The electrochemically active surface (ECSA) of the electrocatalysts is determined. The explanation of such activity of catalysts is given according to the results of the work that demonstrate that a non-noble metal cathode can be more effective for NO₂-RR.

Keywords: electrocatalysis, nitrite reduction reaction, platinum catalyst, cobalt catalyst, green chemistry