

КАТОДНОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА НА ДИСИЛИЦИДЕ ЖЕЛЕЗА.**II. КИСЛАЯ СРЕДА****М.М. Кузьминых, В.В. Пантелеева, А.Б. Шеин**

Мария Михайловна Кузьминых, Виктория Вячеславовна Пантелеева,
Анатолий Борисович Шеин*

Кафедра физической химии, Пермский государственный национальный
исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, Российская
Федерация, 614990

E-mail: ashein@psu.ru*

Исследованы кинетика и механизм реакции выделения водорода на $FeSi_2$ -электроре в растворе 0,5 М H_2SO_4 . Установлено, что реакция выделения водорода на дисилициде железа в сернокислом электролите протекает по маршруту разряд – электрохимическая десорбция, где десорбция – скорость-определяющая стадия, обе стадии необратимы, коэффициенты переноса стадий равны, одновременно протекает реакция абсорбции водорода в кинетическом режиме (во всем изученном интервале потенциалов), адсорбция атомарного водорода описывается уравнением изотермы Ленгмюра. Отмечается влияние тонкой оксидной пленки, близкой по составу к SiO_2 , на кинетику выделения водорода на $FeSi_2$ при невысоких катодных поляризациях. Изучено влияние различных способов модификации поверхностного слоя $FeSi_2$ -электрода на кинетику и механизм катодного процесса. Обнаружено, что модификация поверхности дисилицида железа наводороживанием в 0,5 М H_2SO_4 при $i = 30$ мА/см², анодным травлением в 0,5 М H_2SO_4 при $E = 0,4$ В (ст.в.э.), анодным травлением в 1,0 М NaOH при $E = 0,1$ В (ст.в.э.), химическим травлением в 5,0 М NaOH при 70 °С снижает перенапряжение выделения

водорода; механизм катодного процесса в результате модификации не изменяется. На основе измерений дифференциальной емкости выявлено, что уменьшение перенапряжения выделения водорода на дисилициде железа обусловлено действием двух факторов: развитием поверхности и изменением состава поверхностного слоя электрода. Сделан вывод, что $FeSi_2$ в сернокислом электролите представляет перспективный электродный материал, проявляющий активность в реакции электрохимического выделения водорода.

Ключевые слова: дисилицид железа $FeSi_2$, катодное выделение водорода, сернокислый электролит, модификация

ВВЕДЕНИЕ

Катодная реакция выделения водорода – одна из важнейших электрохимических реакций [1, 2]. В настоящее время значительное внимание уделяется поиску материалов, активных в реакции электролитического выделения водорода, и разработке способов повышения их эффективности при получении водорода [2-6]. Перспективными в этом отношении материалами оказываются металлоподобные соединения, например, силициды [7, 8], германиды переходных металлов [8], тройные соединения [9].

Предметом настоящей работы является исследование кинетики и механизма реакции выделения водорода (р.в.в.) на дисилициде железа ($FeSi_2$) в сернокислом электролите, определение электрохимической активности $FeSi_2$ в реакции выделения водорода (р.в.в.), установление влияния различных способов модификации поверхностного слоя силицида на скорость р.в.в.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Материалы исследования и методика эксперимента подробно описаны в работе [10]. В данной части работы исследования проводили в растворе 0,5 М H_2SO_4 (х.ч.). Все потенциалы в работе приведены относительно стандартного водородного электрода.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Катодные поляризационные кривые FeSi_2 -электрода, немодифицированного и подвергнутого различным видам обработки, в растворе 0,5 М H_2SO_4 имеют однотипный вид и характеризуются наличием тафелевского участка при E от -0,40 до -0,55 В с наклоном, равным $\sim(0,120 - 0,144)$ В. Модификация поверхности FeSi_2 наводороживанием в 0,5 М H_2SO_4 при $i = 30 \text{ mA/cm}^2$ снижает перенапряжение выделения водорода на $\sim 0,08$ В, анодным травлением в 0,5 М H_2SO_4 при $E = 0,4$ В – на $\sim 0,01$ В, анодным травлением в 1,0 М NaOH при $E = 0,1$ В – на $\sim 0,09$ В, химическим травлением – на $\sim 0,14$ В (при $i = 1 \text{ mA/cm}^2$).

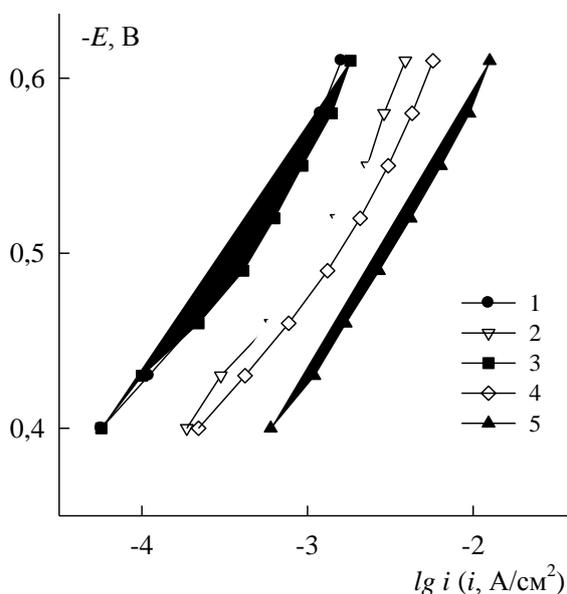


Рис.1. Катодные поляризационные кривые FeSi_2 -электрода в 0,5 М H_2SO_4 : 1 – без обработки; 2 – наводороживание при $i = 30 \text{ mA/cm}^2$; 3 – анодное травление

в 0,5 М H₂SO₄; 4 – анодное травление в 1,0 М NaOH; 5 – химическое травление в 5,0 М NaOH при 70 °С

Дифференциальная емкость немодифицированного FeSi₂-электрода в растворе 0,5 М H₂SO₄ в исследованной области составляет ~6 мкФ/см² (при $f = 10$ кГц) и слабо зависит от потенциала (рис.2). Низкие значения емкости FeSi₂ могут быть обусловлены наличием на его поверхности диэлектрической пленки SiO₂, которая полностью не восстанавливается при невысоких катодных поляризациях. Согласно [11] диоксид кремния является устойчивым в кислых средах в катодной области. Пониженные значения дифференциальной емкости также могут быть связаны с полупроводниковыми свойствами материала электрода [12]. Однако в щелочном растворе емкость FeSi₂-электрода имеет обычные для твердых металлических материалов значения (~40 мкФ/см²) [10]. По-видимому, фактором, обуславливающим низкие значения емкости дисилицида железа в кислом растворе, является наличие на его поверхности тонкой диэлектрической оксидной пленки SiO₂.

Модификация FeSi₂-электрода наводороживанием и анодным травлением в растворе серной кислоты снижает дифференциальную емкость, другие виды модификации – повышают. Снижение значений C при модификации наводороживанием и, в особенности, анодной поляризацией в растворе серной кислоты подтверждает предположение о наличии тонкого оксидного слоя на электроде.

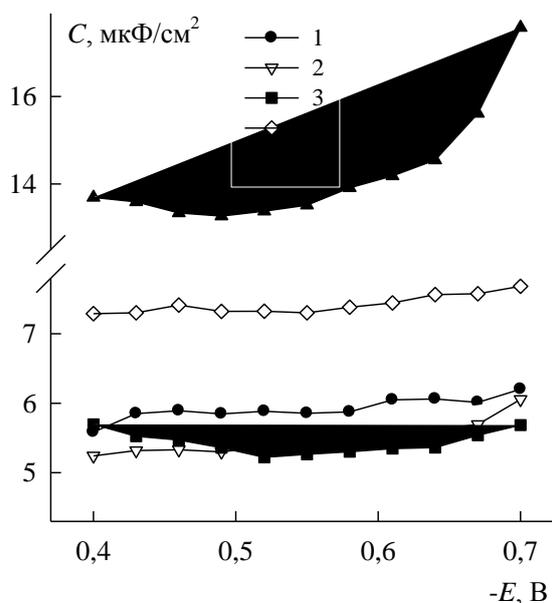


Рис.2. Зависимость дифференциальной емкости FeSi_2 -электрода в 0,5 М H_2SO_4 от потенциала при частоте 10 кГц: 1 – без обработки; 2 – наводороживание при $i = 30 \text{ mA/cm}^2$; 3 – анодное травление в 0,5 М H_2SO_4 ; 4 – анодное травление в 1,0 М NaOH ; 5 – химическое травление в 5,0 М NaOH при 70 °С

Отношение емкостей модифицированного и немодифицированного FeSi_2 -электрода равно 0,94; 0,90; 1,25 и 2,31 соответственно для модификации наводороживанием при $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, анодным травлением в 0,5 М H_2SO_4 , анодным травлением в 1,0 М NaOH и химическим травлением в 5,0 М NaOH при 70 °С (при $E = -0,55 \text{ В}$). Отношение плотности токов силицида в этих же условиях составляет соответственно 2,8; 1,1; 3,7 и 7,8. Отношение плотности токов превышает отношение емкостей. Из этого следует, что скорость р.в.в. на модифицированном дисилициде железа увеличивается не только в результате развития поверхности электрода, но и в результате изменения состава поверхностного слоя.

Спектры импеданса немодифицированного FeSi_2 -электрода в растворе 0,5 М H_2SO_4 в исследованной области потенциалов представляют собой емкостные полуокружности со смещенным центром (рис.3).

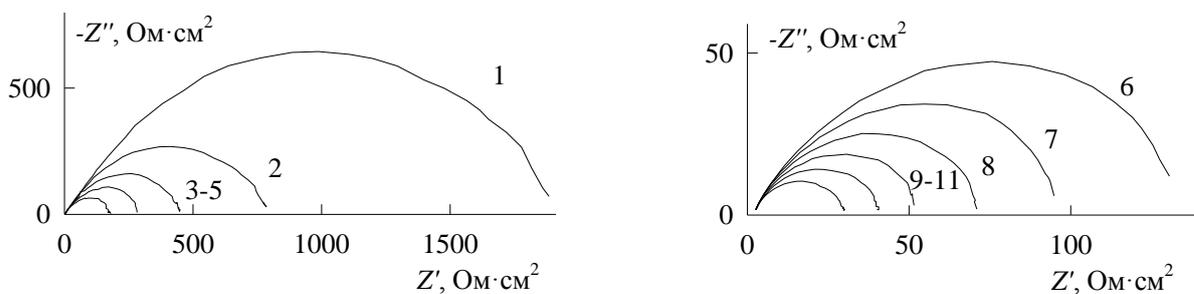
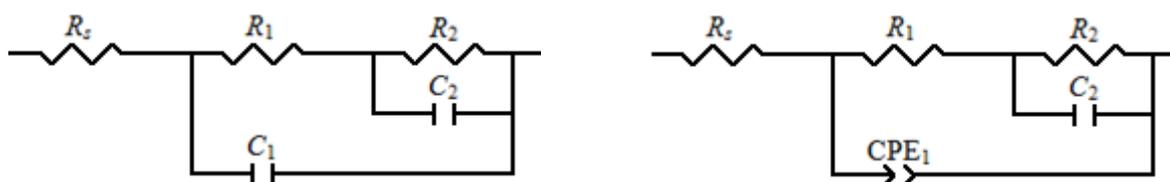


Рис.3. Спектры импеданса FeSi₂-электрода в 0,5 М Н₂SO₄ при E, В:

1 – -0,40; 2 – -0,43; 3 – -0,46; 4 – -0,49; 5 – -0,52; 6 – -0,55; 7 – -0,58; 8 – -0,61;
9 – -0,64; 10 – -0,67; 11 – -0,70

Для моделирования р.в.в. на FeSi₂-электроде в растворе 0,5 М Н₂SO₄ использована эквивалентная электрическая схема на рис.4а. В этой схеме: R_s – сопротивление электролита, R_1 – сопротивление переноса заряда, сопротивление R_2 и емкость C_2 описывают адсорбцию атомарного водорода на поверхности электрода, C_1 – емкость двойного электрического слоя. Сопротивления R_1 и R_2 зависят от кинетических параметров обеих стадий р.в.в. В схеме на рис. 4б вместо двойнослойной емкости используется элемент постоянной фазы CPE₁, который точнее описывает процесс заряжения двойного электрического слоя на неоднородной поверхности твердого электрода. Отсутствие в схемах на рис.4 параллельной $R_{ox}C_{ox}$ -цепочки (R_{ox} и C_{ox} – сопротивление ионного транспорта через оксидную пленку и емкость оксидной пленки), подключенной последовательно к межфазному импедансу и отражающей присутствие поверхностной оксидной пленки на силициде, обусловлено небольшой толщиной пленки в катодной области; в результате вклад импеданса пленки в общий импеданс мал, и область релаксации в цепочке $R_{ox}C_{ox}$ с малыми R_{ox} и C_{ox} приходится на частоты выше 20 кГц.



(a)

(б)

Рис.4. Эквивалентные электрические схемы для FeSi_2 в 0,5 М H_2SO_4 в области потенциалов выделения водорода

Значения параметра χ^2 для эквивалентной схемы на рис.4б находятся в интервале $(2 - 7) \cdot 10^{-5}$ (при оценке χ^2 использовали весовые коэффициенты, рассчитанные по экспериментальным значениям модуля импеданса). Значения параметров эквивалентной схемы приведены в табл.1.

Таблица 1. Значения параметров эквивалентной схемы на рис.4б для FeSi_2 -электрода в 0,5 М H_2SO_4

$E, \text{В}$	$R_1, \text{Ом} \cdot \text{см}^2$	$R_2, \text{Ом} \cdot \text{см}^2$	$C_2 \cdot 10^5, \text{Ф} \cdot \text{см}^{-2}$	$Q_1 \cdot 10^5, \text{Ф} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{(p-1)}$	p_1
-0,40	456	1130	0,98	13,0	0,706
-0,43	276	535	1,57	13,5	0,703
-0,46	174	278	1,78	10,2	0,732
-0,49	127	162	1,96	8,73	0,747
-0,52	86,3	92,5	1,69	7,37	0,764
-0,55	79,5	54,2	2,26	6,86	0,770
-0,58	64,4	30,1	2,68	6,21	0,779
-0,61	46,8	22,3	2,39	4,91	0,804
-0,64	37,7	13,6	2,51	4,56	0,810
-0,67	30,3	8,2	3,71	3,56	0,831

Результаты определения численных значений элементов эквивалентной схемы на рис.4б для FeSi_2 -электрода в 0,5 М H_2SO_4 приведены на рис.5. Зависимости $\lg X$ ($X = R_1, R_2, C_2$) от потенциала электрода близки к прямолинейным. Наклоны $d \lg R_1 / dE, d \lg R_2 / dE, d \lg C_2 / dE$ равны 3,8; 7,5 и -1,3 В^{-1} соответственно. Из полученных зависимостей элементов фарадеевского импеданса от E можно сделать вывод о выполнении изотермы адсорбции Ленгмюра для $N_{\text{адс}}$. Экспериментальные значения $d \lg X / dE$ близки к теоретическим значениям наклонов (но ниже теоретического) для механизма разряд – электрохимическая десорбция, где десорбция – скорость-определяющая стадия, обе стадии необратимы, коэффициенты переноса

равны, одновременно протекает реакция абсорбции водорода в кинетическом режиме [13, 14].

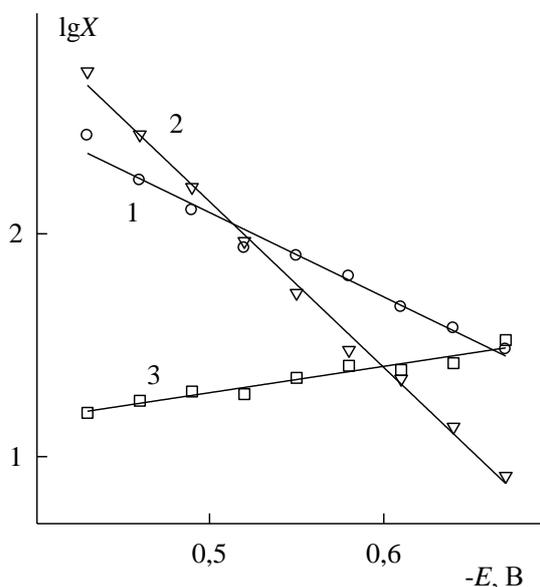


Рис.5. Зависимости 1 – $\lg R_1$ (R_1 , Ом·см²), 2 – $\lg R_2$ (R_2 , Ом·см²), 3 – $\lg C_2$ (C_2 , мкФ/см²) для FeSi₂-электрода в 0,5 М Н₂SO₄ от потенциала

Модификация рабочей поверхности FeSi₂-электрода оказывает слабое влияние на вид спектров импеданса, однако снижает модуль импеданса $|Z|$. Уменьшение величины $|Z|$ находится в соответствии с поляризационными измерениями (рис.1). Для моделирования р.в.в. на модифицированном дилициде железа также использована эквивалентная схема на рис.4б. Значения параметра χ^2 находятся в интервале $(2 - 7) \cdot 10^{-5}$. Зависимости $\lg X$ от потенциала близки к прямолинейным, наклоны $d\lg X/dE$ имеют сопоставимые с этими величинами для немодифицированного электрода значения.

ВЫВОДЫ

Установлено, что реакция выделения водорода на FeSi₂-электроде в сернокислом электролите протекает по маршруту разряд – электрохимическая десорбция с замедленной стадией десорбцией, обе стадии необратимы, коэффициенты переноса равны, одновременно протекает

реакция абсорбции водорода в кинетическом режиме; для адсорбированного водорода выполняется изотерма адсорбции Ленгмюра. Отмечается влияние тонкой оксидной пленки на кинетику выделения водорода на FeSi_2 при невысоких катодных поляризациях. Обнаружено, что модификация поверхности FeSi_2 наводороживанием, анодным травлением в растворах серной кислоты и гидроксида натрия, высокотемпературным химическим травлением в щелочном растворе снижает перенапряжение выделения водорода; механизм реакции выделения водорода в результате модификации не изменяется. Уменьшение перенапряжения выделения водорода обусловлено развитием и изменением состава поверхностного слоя электрода. Сделан вывод, что FeSi_2 представляет перспективный электродный материал, проявляющий активность в реакции электролитического выделения водорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Козин Л.Ф., Волков С.В.** Современная энергетика и экология: проблемы и перспективы. Киев: Наукова думка. 2006. 775 с.
2. **Eftekhari A.** Electrocatalysts for hydrogen evolution reaction // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. V. 42. N 16. P. 11053-11077. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.02.125.
3. **Манилевич Ф.Д., Куцкий А.В., Козин Л.Ф.** Закономерности выделения водорода на катодах, модифицированных сплавом Mo-Co // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2010. Т. 46. № 5. С. 454-460.
4. **Вигдорович В.И., Цыганкова Л.Е., Кичигин В.И., Гладышева И.Е.** Кинетика реакции выделения водорода в кислых средах на прессованных микрографитовых электродах, модифицированных углеродными нанотрубками. II. Импедансные исследования // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2012. Т. 48. № 4. С. 373-378.

5. Meyer S., Nikiforov A.V., Petrushina I.M., Kohler K., Christensen E., Jensen J.O., Bjerrum N.J. Transition metal carbides (WC, Mo₂C, TaC, NbC) as potential electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction (HER) at medium temperatures // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2015. V. 40. N 7. P. 2905-2911. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.12.076.

6. Schalenbach M., et al. Nickel-molybdenum alloy catalysts for the hydrogen evolution reaction: Activity and stability revised // *Electrochimica Acta*. 2018. V. 259. P. 1154-1161. DOI: 10.1016/j.electacta.2017.11.069.

7. Kichigin V.I., Shein A.B. Kinetics and mechanism of hydrogen evolution reaction on cobalt silicides in alkaline solutions // *Electrochimica Acta*. 2015. V. 164. P. 260-266. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.02.198.

8. Шейн А.Б. Электрохимия силицидов и германидов переходных металлов. Пермь, Перм. гос. ун-т, 2009. 269 с.

9. Шейн А.Б., Кичигин В.И., Пантелеева В.В. Исследование электрокаталитической активности ряда металлоподобных и интерметаллических соединений в реакции выделения водорода и разработка способов ее повышения // *Вестник Пермского научного центра УрО РАН*. 2017. № 2. С. 96-100.

10. Кузьминых М.М., Пантелеева В.В., Шейн А.Б. Катодное поведение дисилицида железа. I. Щелочная среда // *Известия вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т.61. № N. С. N-N.

11. Shamsul Huq A. K.M., Rosenberg A. J. J. Electrochemical Behavior of Nickel Compounds: I. The Hydrogen Evolution Reaction on NiSi, NiAs, NiSb, NiS, NiTe₂, and Their Constituent Elements // *Electrochem. Soc.* 1964. V. 111. N 3. P. 270-278. DOI: 10.1007/BF02849200.

12. Гельд П.В., Сидоренко Ф.А. Силициды переходных металлов четвертого периода. М.: Металлургия. 1981. 632 с.

13. Kichigin V.I., Shein A.B. Diagnostic criteria for hydrogen evolution mechanisms in electrochemical impedance spectroscopy // *Electrochimica Acta*. 2014. V. 138. P. 325-333. DOI: 10.1016/j.electacta.2014.06.114.

14. **Kichigin V.I., Shein A.B.** Influence of hydrogen absorption on the potential dependence of the Faradaic impedance parameters of hydrogen evolution reaction // *Electrochimica Acta*. 2016. V. 201. P. 233-239. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.03.194.

REFERENCES

1. **Kozin L.F., Volkov S.V.** Modern energy and ecology: problems and prospects. Kiev: Naukova dumka. 2006. 775 p.

2. **Eftekhari A.** Electrocatalysts for hydrogen evolution reaction // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. V. 42. N 16. P. 11053-11077. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.02.125.

3. **Manilevich F.D., Kutsyy A.V., Kozin L.F.** Patterns of hydrogen evolution on cathodes modified with Mo-Co alloy // *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*. 2010. V. 46. N 5. P. 454-460. (in Russian).

4. **Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Kichigin V.I., Gladysheva I.E.** Кинетика реакции выделения водорода в кислых средах на прессованных микрографитовых электродах, модифицированных углеродными нанотрубками. II. Импедансные исследования // *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*. 2012. V. 48. N. 4. P. 373-378. (in Russian).

5. **Meyer S., Nikiforov A.V., Petrushina I.M., Kohler K., Christensen E., Jensen J.O., Bjerrum N.J.** Transition metal carbides (WC, Mo₂C, TaC, NbC) as potential electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction (HER) at medium temperatures // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2015. V. 40. N 7. P. 2905-2911. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.12.076.

6. **Schalenbach M., et al.** Nickel-molybdenum alloy catalysts for the hydrogen evolution reaction: Activity and stability revised // *Electrochimica Acta*. 2018. V. 259. P. 1154-1161. DOI: 10.1016/j.electacta.2017.11.069.

7. **Kichigin V.I., Shein A.B.** Kinetics and mechanism of hydrogen evolution reaction on cobalt silicides in alkaline solutions // *Electrochimica Acta*. 2015. V. 164. P. 260-266. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.02.198.

8. **Shein A.B.** Electrochemistry of silicides and germanides of transition metals. Perm', Perm. gos. un-t. 2009, 269 p.

9. **Shein A.B., Kichigin V.I., Panteleeva V.V.** Investigation of the electrocatalytic activity of a number of metal-like and intermetallic compounds in the hydrogen evolution reaction and the development of ways to improve it // *Vestnik Permskogo nauchnogo tsentra UrO RAN*. 2017. N 2. P. 96-100.

10. **Kuz'minykh M.M., Panteleeva V.V., Shein A.B.** Катодное поведение дисилицида железа. I. Щелочная среда // *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. T.61. N N. P. N-N.

11. **Shamsul Huq A. K.M., Rosenberg A. J. J.** Electrochemical Behavior of Nickel Compounds: I. The Hydrogen Evolution Reaction on NiSi, NiAs, NiSb, NiS, NiTe₂, and Their Constituent Elements // *Electrochem. Soc.* 1964. V. 111. N 3. P. 270-278. DOI: 10.1007/BF02849200.

12. **Gel'd P.V., Sidorenko F.A.** Silicides of transition metals of the fourth period. M.: Metallurgiya. 1981. 632 p.

13. **Kichigin V.I., Shein A.B.** Diagnostic criteria for hydrogen evolution mechanisms in electrochemical impedance spectroscopy // *Electrochimica Acta*. 2014. V. 138. P. 325-333. DOI: 10.1016/j.electacta.2014.06.114.

14. **Kichigin V.I., Shein A.B.** Influence of hydrogen absorption on the potential dependence of the Faradaic impedance parameters of hydrogen evolution reaction // *Electrochimica Acta*. 2016. V. 201. P. 233-239. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.03.194.

Поступила в редакцию

Подписи к рисункам в статье М.М. Кузьминых, В.В. Пантелеевой, А.Б. Шеина

КАТОДНОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА НА ДИСИЛИЦИДЕ ЖЕЛЕЗА.

II. КИСЛАЯ СРЕДА

Рис.1. Катодные поляризационные кривые FeSi₂-электрода в 0,5 М H₂SO₄: 1 – без обработки; 2 – наводороживание при $i = 30$ мА/см²; 3 – анодное травление в 0,5 М H₂SO₄; 4 – анодное травление в 1,0 М NaOH; 5 – химическое травление в 5,0 М NaOH при 70 °С

Fig.1. Cathodic polarization curves for FeSi₂ in 0,5 М H₂SO₄: 1 – without treatment; 2 – hydrogenation at $i = 30$ mA/cm²; 3 – anodic etching in 0,5 М H₂SO₄; 4 – anodic etching in 1,0 М NaOH; 5 – chemical etching in 5,0 М NaOH at 70 °С

Рис.2. Зависимость дифференциальной емкости FeSi₂-электрода в 0,5 М H₂SO₄ от потенциала при частоте 10 кГц: 1 – без обработки; 2 – наводороживание при $i = 30$ мА/см²; 3 – анодное травление в 0,5 М H₂SO₄; 4 – анодное травление в 1,0 М NaOH; 5 – химическое травление в 5,0 М NaOH при 70 °С

Fig.2. Dependence of differential capacitance of FeSi₂ in 0,5 М H₂SO₄ on the potential at the frequency 10 kHz: 1 – without treatment; 2 – hydrogenation at $i = 30$ mA/cm²; 3 – anodic etching in 0,5 М H₂SO₄; 4 – anodic etching in 1,0 М NaOH; 5 – chemical etching in 5,0 М NaOH at 70 °С

Рис.3. Спектры импеданса для FeSi₂-электрода в 0,5 М H₂SO₄ при E , В: 1 – -0,40; 2 – -0,43; 3 – -0,46; 4 – -0,49; 5 – -0,52; 6 – -0,55; 7 – -0,58; 8 – -0,61; 9 – -0,64; 10 – -0,67; 11 – -0,70

Fig.3. Impedance spectra of FeSi₂ in 0,5 М H₂SO₄ at E , V:

1 – -0,40; 2 – -0,43; 3 – -0,46; 4 – -0,49; 5 – -0,52; 6 – -0,55; 7 – -0,58; 8 – -0,61; 9 – -0,64; 10 – -0,67; 11 – -0,70

Рис.4. Эквивалентные электрические схемы для FeSi₂-электрода в 0,5 М H₂SO₄ в области потенциалов выделения водорода (пояснения в тексте)

Fig.4. Equivalent circuits for FeSi₂ in 0,5 М H₂SO₄ for the range of potentials of hydrogen evolution (comments in the text)

Рис.5. Зависимости 1 – lg R₁ (R₁, Ом·см²), 2 – lg R₂ (R₂, Ом·см²), 3 – lg C₂ (C₂, мкФ/см²) от потенциала E для FeSi₂-электрода в 0,5 М H₂SO₄

Fig.5. Dependencies of lg R₁ (R₁, Ohm·cm²), 2 – lg R₂ (R₂, Ohm·cm²), 3 – lg C₂ (C₂, μF/cm²) on the potential E for FeSi₂ in 0,5 М H₂SO₄

Таблица

**Значения параметров эквивалентной схемы (рис.4, б)
для FeSi₂-электрода в 0,5 М H₂SO₄**

**Table. The values of the equivalent circuit parameters (Fig.4,b) for FeSi₂
in 0,5 М H₂SO₄**

$E, \text{В}$	$R_1, \text{Ом} \cdot \text{см}^2$	$R_2, \text{Ом} \cdot \text{см}^2$	$C_2 \cdot 10^5, \text{Ф} \cdot \text{см}^{-2}$	$Q_1 \cdot 10^5, \text{Ф} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{(p-1)}$	p_1
-0,40	456	1130	0,98	13,0	0,706
-0,43	276	535	1,57	13,5	0,703
-0,46	174	278	1,78	10,2	0,732
-0,49	127	162	1,96	8,73	0,747
-0,52	86,3	92,5	1,69	7,37	0,764
-0,55	79,5	54,2	2,26	6,86	0,770
-0,58	64,4	30,1	2,68	6,21	0,779
-0,61	46,8	22,3	2,39	4,91	0,804
-0,64	37,7	13,6	2,51	4,56	0,810
-0,67	30,3	8,2	3,71	3,56	0,831

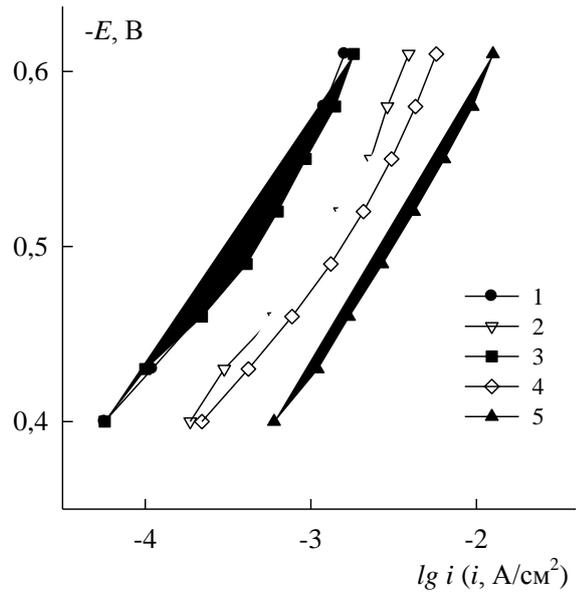


Рис.1.

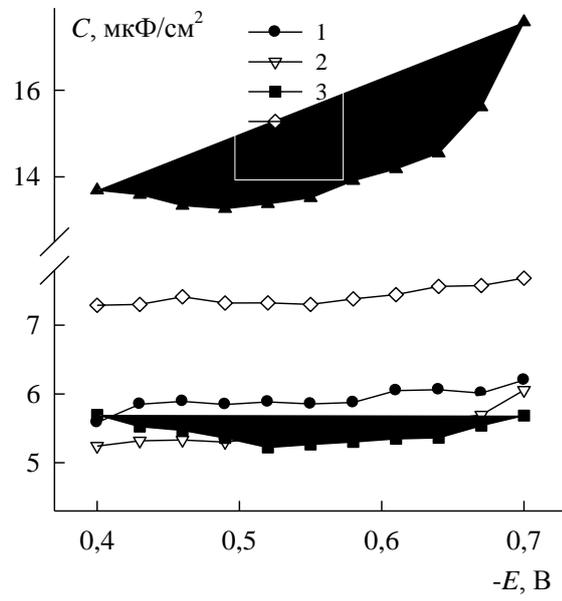


Рис.2.

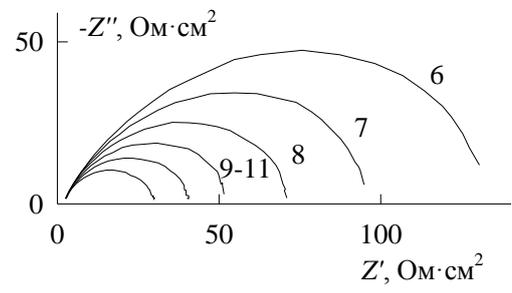
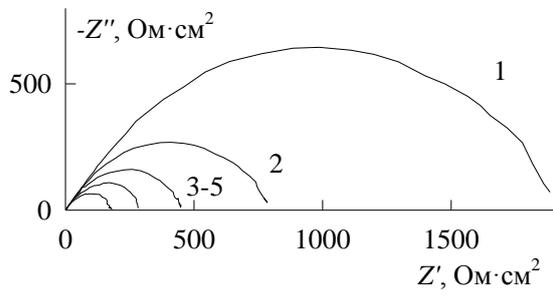


Рис.3.

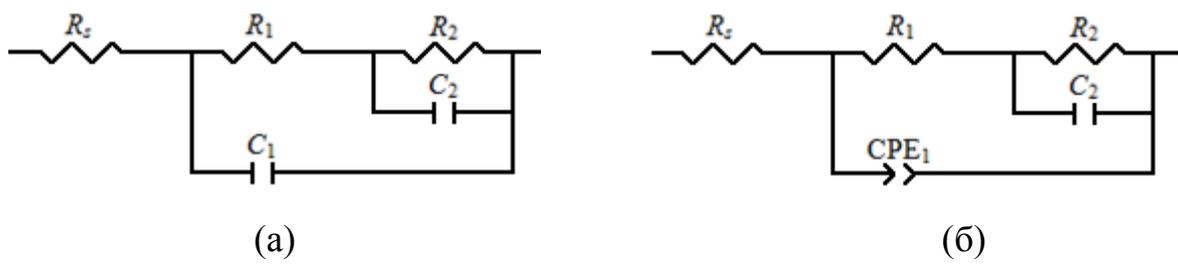


Рис.4.

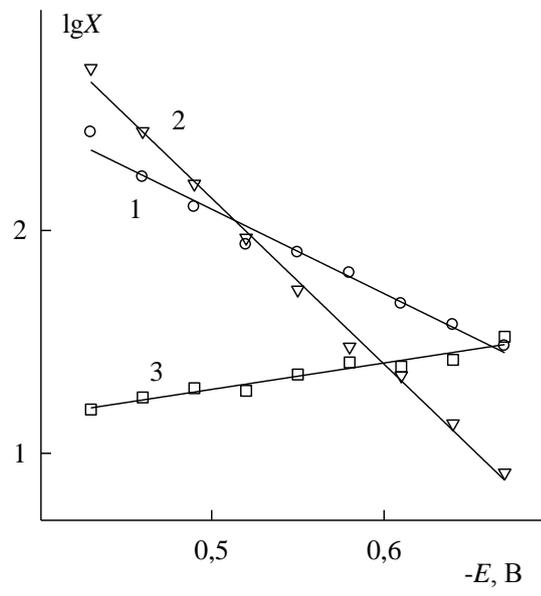


Рис.5.