

---

---

УДК 544.636:546.93

## ЕМКОСТЬ И ИМПЕДАНС ИРИДИЕВОГО ЭЛЕКТРОДА В РАСПЛАВЛЕННЫХ ХЛОРИДАХ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

© 2023 г. Е. В. Кириллова\*

*Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*\*e-mail: e.kirillova@ihte.uran.ru*

Поступила в редакцию 19.08.2022 г.

После доработки 10.09.2022 г.

Принята к публикации 24.09.2022 г.

Методом спектроскопии электрохимического импеданса исследованы закономерности поведения емкости иридиевого электрода в зависимости от основных физико-химических параметров: электрического потенциала, температуры, радиуса катиона щелочного металла. Также проведена проверка влияния частоты сигнала, используемого в переменноточковых электрохимических методах исследования, на величину емкости и форму емкостной кривой. Данные по емкости иридиевого электрода получены в расплавленных хлоридах натрия, калия и цезия в диапазоне температур 1093–1123 К и диапазоне частоты переменного сигнала  $3 \cdot 10^0 - 3 \cdot 10^4$  Гц во всей доступной области электрической поляризации. Полученные емкостные кривые имеют два основных минимума с максимумом между ними. Один из этих минимумов (катодный) идентифицирован как классический потенциал минимума емкости. Уменьшение частоты сигнала и температуры эксперимента, а также увеличение радиуса катиона в ряду NaCl–KCl–CsCl приводит к появлению одного или двух дополнительных минимумов в области потенциалов между основными минимумами. Глубина этих промежуточных минимумов возрастает с ростом радиуса катиона щелочного металла солевого электролита, а их потенциал при этом смещается в положительную сторону. Расчетные значения емкости двойного электрического слоя и адсорбционной емкости были получены методом эквивалентных электрических схем. Один из дополнительных минимумов, полученных при прямом измерении зависимости емкости электрода от потенциала на высокой частоте, воспроизводится при расчете емкости двойного слоя. Второй из дополнительных минимумов, полученных на низкой частоте, воспроизводится при расчете адсорбционной емкости.

*Ключевые слова:* иридий, хлориды щелочных металлов, емкость, потенциал минимума емкости, адсорбция

**DOI:** 10.31857/S0235010623010048, **EDN:** N1BYAL

### ВВЕДЕНИЕ

Иридий, его соединения и сплавы, наряду с другими металлами платиновой группы, — одни из лучших катализаторов для каталитического риформинга, для получения и хранения водорода, а также для добавок, улучшающих свойства электродных материалов, предназначенных для сенсоров, аккумуляторов, источников тока. Изотоп Ir-192 используется в ионизирующих источниках излучения для неразрушающих методов анализа [1–9]. Металлический иридий применяется для иридий-рениевых покрытий на различных подложках для нужд ракетной промышленности [10–14]. Однако применение этого металла ограничено его высокой стоимостью и малыми объемами добычи. В настоящее время ведется активный поиск способов удешевления технологий получения “зеленого” водорода за счет новых материалов, более доступных, чем ме-

таллы платиновой группы, однако превзойти их по эффективности и стабильности пока не удается [15–18]. Поэтому еще одним направлением научного поиска является изучение свойств иридийсодержащих электродных материалов в средах, обеспечивающих более быстрое и полное протекание электрохимических процессов на покрытиях из благородных металлов по сравнению с используемыми в промышленности. Одним из наиболее дешевых, термически и химически устойчивых вариантов таких сред для получения и эксплуатации иридиевых покрытий являются расплавленные соли. Имеющиеся научные данные по поведению Ir и Re–Ir при относительно высоких температурах в расплавах в основном связаны с получением покрытий и исследованием их механических и коррозионных свойств [11–14, 19–21]. В то же время знания механизмов адсорбции на границе Ir/солевой расплав необходимы для процессов, связанных с катализом и электрокатализом с участием иридия в высокотемпературных электролитах.

Целью данной работы является изучение закономерностей поведения емкости иридиевого электрода в зависимости от основных физико-химических параметров: электрического потенциала, температуры, радиуса катиона щелочного металла, а также проверка влияния частоты переменного сигнала в методе электрохимического импеданса на величину емкости и форму емкостной кривой.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Измерения проводили в трехэлектродной ячейке, помещенной в кварцевую пробирку, герметично закрытую пробкой из вакуумной резины. Рабочим электродом служила полупогруженная в расплав иридиевая фольга, приваренная к токоподводу из платиновой проволоки. Электрод сравнения – свинец в эквимольной смеси NaCl–KCl с добавлением 5 мас. % PbCl<sub>2</sub>. Поляризуемый электрод – платиновая пластина. Подробно конструкция ячейки и электрода сравнения описана в [22].

Хлориды щелочных металлов сушили под вакуумом в течение 5 ч, переплавляли на воздухе, затем подвергали 6-кратной зонной плавке в атмосфере очищенного гелия. Рабочий и поляризуемый электроды зачищали, промывали дистиллированной водой, ацетоном (99.5%) и высушивали на воздухе. Эксперимент проводили в атмосфере очищенного аргона при температурах выше температур разложения устойчивых хлоридов иридия (763°C, [23]). Выдержка составляла 4 ч перед первым измерением, затем 1 ч при каждом ступенчатом повышении температуры на 30°–50°. Интервал электрической поляризации выбирали в пределах гладкой части циклической вольтамперной кривой (ЦВА), до начала возрастания катодного и анодного тока (рис. 1). Перед началом измерений проводили трехкратное циклирование потенциала для дополнительной очистки поверхности рабочего электрода. Время пребывания ячейки при крайних катодных и анодных потенциалах было сведено к минимуму.

Измерения проводили на потенциостате-гальваностате Parstat 2273 в потенциостатическом режиме, с амплитудой переменного сигнала 5 мВ. Температуру в печи сопротивления регулировали с помощью терморегулятора-измерителя ВАРТА ТП 703 с точностью ±1°. Импеданс измеряли с шагом 50–100 мВ в диапазоне частот переменного тока  $3 \cdot 10^0$ – $3 \cdot 10^4$  Гц. При измерении зависимости емкости от потенциала шаг поляризации составлял 10 мВ, диапазон частот тот же. Все потенциалы приведены относительно свинцового электрода сравнения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Емкость Ir электрода*

Вид емкостных кривых в расплаве CsCl при разных частотах переменного сигнала приведен на рис. 2. На всех кривых присутствуют два основных потенциала минимума

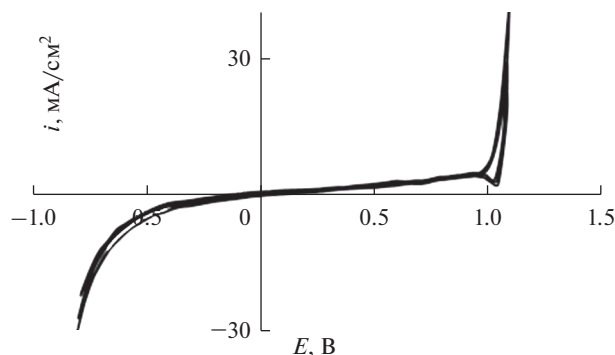


Рис. 1. ЦВА кривая Ir в CsCl,  $T = 1093$  К.

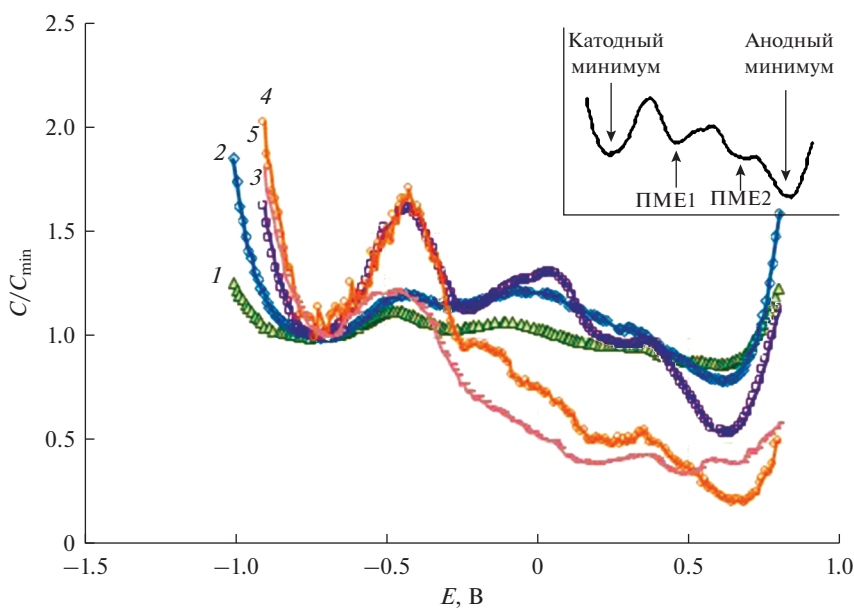


Рис. 2. Приведенная емкость Ir в CsCl,  $T = 973$  К: 1 – 30, 2 – 10 кГц, 3 – 300, 4 – 30, 5 – 3 Гц; на врезке – условные обозначения минимумов емкости.

емкости (ПМЕ) – катодный и анодный. На высоких частотах 30 и 10 кГц (рис. 2, кривые 1–2) наблюдается один дополнительный минимум ПМЕ1, а с понижением частоты до 300 Гц и ниже появляется второй дополнительный минимум ПМЕ2 (рис. 2, кривые 3–5). ПМЕ1 и ПМЕ2 менее выражены, чем основные минимумы, и всегда находятся в промежутке между ними. Условные обозначения минимумов показаны на врезке к рис. 2. Такая сложная форма кривой затрудняет ее интерпретацию, прежде всего в определении классического минимума емкости, который можно соотнести с потенциалом нулевого заряда (ПНЗ) для металла в данном электролите при данной температуре и частоте переменного сигнала.

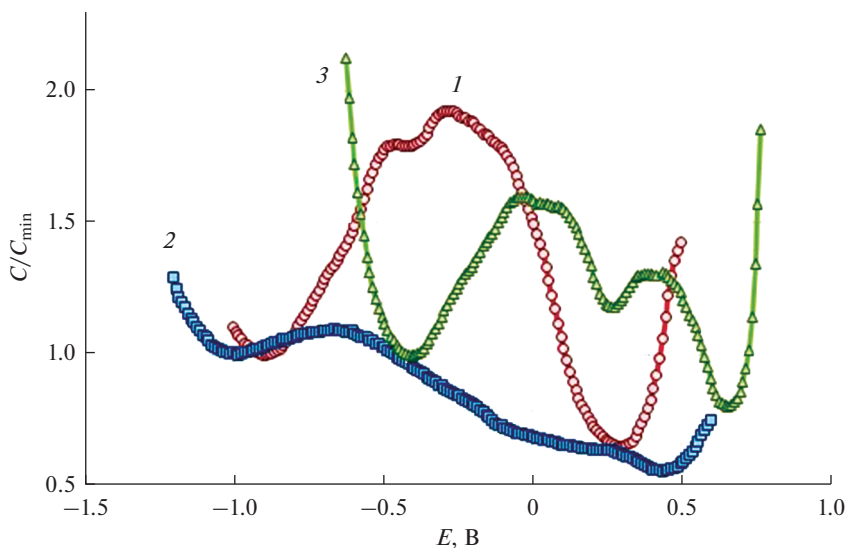


Рис. 3. Приведенная емкость Ir электрода,  $T = 1093$  К,  $f = 10$  кГц: 1 – NaCl, 2 – KCl, 3 – CsCl.

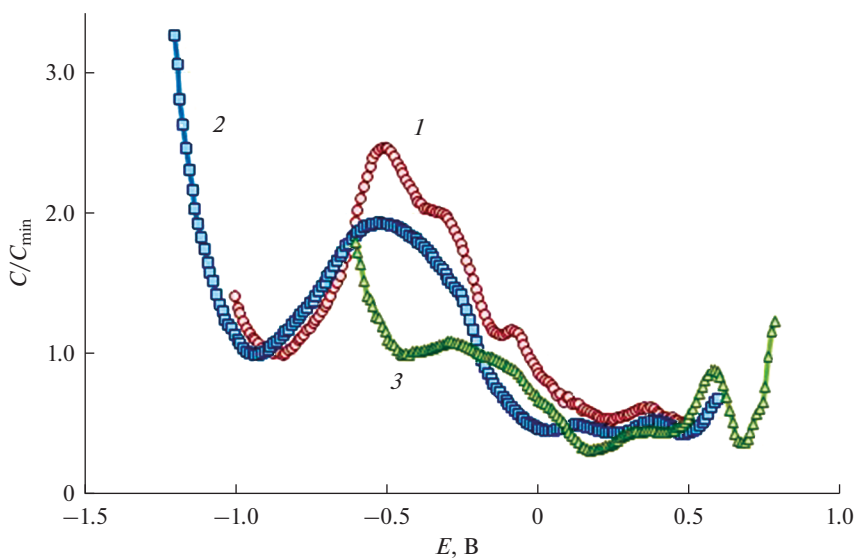


Рис. 4. Приведенная емкость Ir электрода,  $T = 1093$  К,  $f = 10$  Гц: 1 – NaCl, 2 – KCl, 3 – CsCl.

Сравнение емкостных кривых NaCl, KCl и CsCl показывает, что три минимума на высокой частоте (10 кГц, рис. 3) и четыре минимума на низкой (10 Гц, рис. 4) характерны для всех трех исследованных хлоридов, при этом глубина промежуточных минимумов возрастает в ряду  $\text{NaCl} < \text{KCl} < \text{CsCl}$ , а их потенциал с ростом радиуса катиона смещается в положительную сторону (рис. 3).

Закономерности поведения ПМЕ при варьировании температуры, потенциала и частоты для металлов подгруппы меди были подробно изучены в [24]. Похожий про-

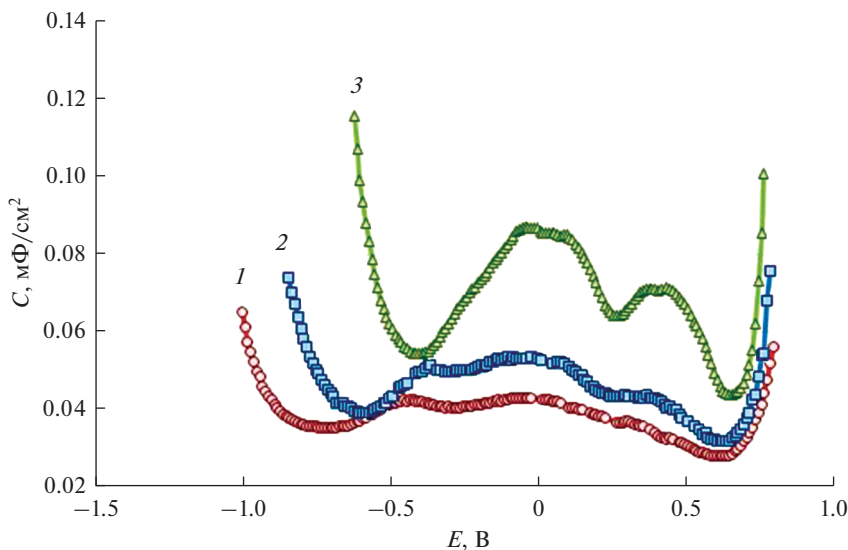


Рис. 5. Дифференциальная емкость Ir электрода в CsCl,  $f = 10$  кГц при  $T = 973$  (1),  $T = 1023$  (2),  $T = 1093$  К (3).

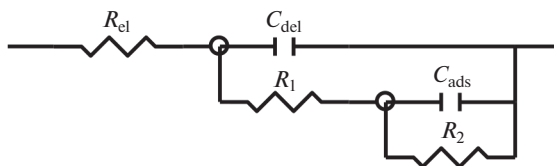


Рис. 6. Эквивалентная цепь для расчета электрохимического импеданса систем Ir–расплав MCl ( $M = \text{Na}, \text{K}, \text{Cs}$ ).  $R_{el}$  – сопротивление электролита,  $C_{del}$  – емкость ДЭС,  $R_1$  и  $R_2$  – сопротивление переноса заряда,  $C_{ads}$  – адсорбционная емкость.

межуточный максимум, уменьшающийся и исчезающий с повышением температуры и частоты был обнаружен на рении в хлоридах щелочных металлов. [25]. Смещение положения дополнительного минимума с ростом радиуса катиона щелочного металла соли на рении происходило в положительном направлении, как и на иридии. С увеличением температуры катодный минимум смещается в положительную сторону, анодный минимум практически не сдвигается (рис. 5). Температурная зависимость катодного ПМЕ позволяет сделать вывод, что он соответствует классическому электрохимическому ПМЕ [24]. Экстраполяция этого потенциала на нулевую частоту даст значение ПНЗ иридия при данной температуре в данном электролите.

#### Импеданс Ir электрода

Эквивалентная схема, использованная для расчета емкости двойного электрического слоя  $C_{дэс}$  и адсорбционной емкости  $C_{адс}$ , приведена на рис. 6. Сравнение расчетных значений этих параметров с емкостью иридиевого электрода, полученной при развертке потенциала, приведено на рис. 7–9.

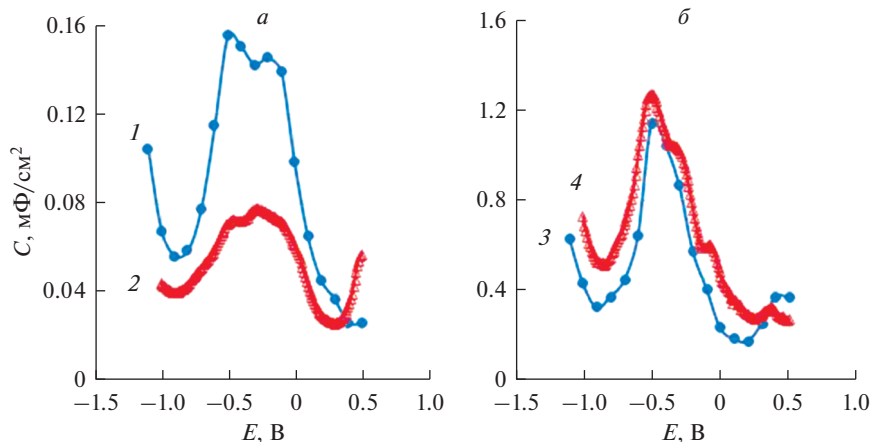


Рис. 7. 1 – емкость ДЭС, 2 – емкость электрода при  $f = 10$  кГц, 3 – адсорбционная емкость, 4 – емкость электрода при  $f = 10$  Гц в NaCl,  $T = 1093$  К.

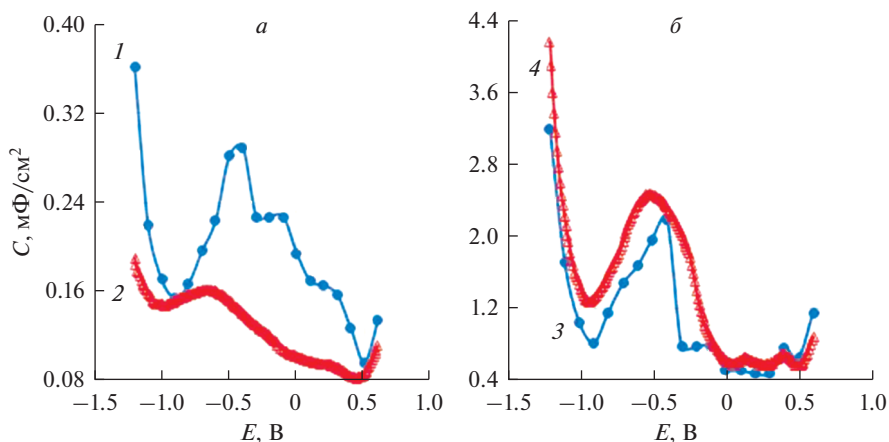


Рис. 8. 1 – емкость ДЭС, 2 – емкость электрода при  $f = 10$  кГц, 3 – адсорбционная емкость, 4 – емкость электрода при  $f = 10$  Гц в KCl,  $T = 1093$  К.

Положение основных минимумов совпадает для  $C_{дэс}$  и  $C_{адс}$ , однако из двух дополнительных минимумов на  $C_{дэс}$  виден ПМЕ1, а на  $C_{адс}$  – ПМЕ2. Величина  $C_{дэс}$  и положение основных минимумов этой кривой совпадают с емкостью, снятой на частоте 10 кГц (рис. 7а, 8а, 9а). Промежуточные значения  $C_{дэс}$  по величине завышены во всех трех хлоридах в сравнении с прямыми измерениями емкости электрода, однако по по-

Таблица 1. Положение промежуточных минимумов емкости электрода,  $C_{дэс}$  и  $C_{адс}$

	ПМЕ1, В, $f = 10$ кГц	ПМЕ $C_{дэс}$ , В	ПМЕ2, В, $f = 10$ Гц	ПМЕ $C_{адс}$ , В
NaCl	-0.40	-0.30	-0.12	—
KCl	-0.09	-0.10	0.05	0.00
CsCl	0.27	0.25	0.18	0.15

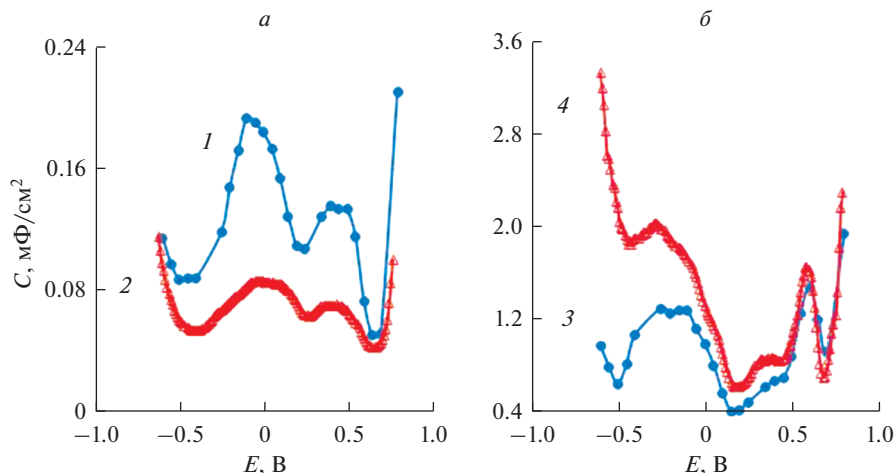


Рис. 9. 1 – емкость ДЭС, 2 – емкость электрода при  $f = 10$  кГц, 3 – адсорбционная емкость, 4 – емкость электрода при  $f = 10$  Гц в CsCl,  $T = 1093$  К.

тенциалу дополнительный минимум емкости  $C_{\text{дэс}}$  хорошо совпадает с ПМЕ1 (табл. 1). Для NaCl он расположен в районе  $-0.3$  В, для KCl  $-0.1$  В и для CsCl  $+0.25$  В. Адсорбционная емкость  $C_{\text{адс}}$  хорошо совпадает как по величине, так и по положению катодного и анодного минимумов с емкостью, снятой на частоте 10 Гц, во всем диапазоне потенциалов (рис. 7б, 8б, 9б). Дополнительный минимум  $C_{\text{адс}}$  в NaCl отсутствует, в KCl расположен в районе  $-0.1$  В, а в CsCl  $+0.15$  В и совпадает с ПМЕ2 (табл. 1). Сравнение параметров эквивалентной цепи с экспериментально измеренной емкостью электрода позволяет предположить, что ПМЕ1 связан с перестройкой ДЭС, возможно, в результате неэлектростатической адсорбции, тогда как ПМЕ2 относится к электростатической адсорбции на электроде, описываемой параметром цепи  $C_{\text{адс}}$ .

## ВЫВОДЫ

Зависимость емкости иридиевого электрода в расплавленных хлоридах натрия, калия и цезия от потенциала, исследованная методом электрохимического импеданса, показала, что вид кривых отличается от классической параболы с восходящими ветвями и одним минимумом. Установлено, что емкостные кривые иридия имеют два основных минимума. Уменьшение частоты сигнала и температуры эксперимента, а также увеличение радиуса катиона в ряду NaCl–KCl–CsCl приводит к появлению одного или двух дополнительных минимумов в области потенциалов между основными минимумами. Расчет емкости двойного электрического слоя и адсорбционной емкости показал качественное и количественное совпадение с емкостью электрода, снятой на частоте переменного сигнала 10 кГц и 10 Гц соответственно, при этом дополнительный минимум емкости на высокой частоте совпадает по положению с минимумом на емкости ДЭС, а на низкой частоте – с минимумом на адсорбционной емкости.

Работа выполнена в рамках государственного задания № АААА-А17-117101140022-2.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Катализ в промышленности. Под ред. Б. Лича. М.: Мир, 1986.

2. Zheng J., Sheng W., Zhuang Z., Xu B., Yan Y. Universal dependence of hydrogen oxidation and evolution reaction activity of platinum-group metals on pH and hydrogen binding energy // *Sci. Adv.* 2016. **2**. e1501602.
3. Rasten E., Hagen G., Tunold R. Electrocatalysis in water electrolysis with solid polymer electrolyte // *Electrochim. Acta.* 2003. **48**. P. 3945–3952.
4. Huang Y., Wu K., Hao R. et al. Iridium doping boosting the electrochemical performance of lithium-rich cathodes for li-ion batteries // *ACS Appl. Energy Mater.* 2021. **4**. № 3. P. 2489–2495.
5. Lin F., Bachman B.F., Boettcher Sh.W. Impact of Electrocatalyst Activity and Ion Permeability on Water-Splitting Photoanodes // *J. Phys. Chem. Lett.* 2015. **6**. P. 2427–2433.
6. Bause S., Decker M., Gerlach F. et al. Development of an iridium-based pH sensor for bioanalytical applications // *J. Solid State Electrochem.* 2018. **22**. P. 51–60.
7. Audichon T., Mayousse E., Morisset S. et al. Electroactivity of RuO<sub>2</sub>–IrO<sub>2</sub> mixed nanocatalysts toward the oxygen evolution reaction in a water electrolyzer supplied by a solar profile // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2014. **39**. P. 16785–16796.
8. Papaderakis A., Tsiplakides D., Balomenou S. et al. Electrochemical impedance studies of IrO<sub>2</sub> catalysts for oxygen evolution // *J. Electroanal. Chem.* 2015. **757**. P. 216–224.
9. Изотопы: свойства, получение, применение / Под ред. Ю. Баранова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
10. Wu W., Chen Z., Wang, L. Oxidation behavior of multilayer iridium coating on niobium substrate // *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2015. **51**. P. 607–612.
11. Zhu L., Bai S., Zhang H. et al. Long-term high-temperature oxidation of iridium coated rhenium by electrical resistance heating method // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2014. **44**. P. 42–48.
12. Huang Y., Bai S., Zhang H. et al. Oxidation of iridium coating on rhenium coated graphite at elevated temperature in stagnated air // *Appl. Surf. Sci.* 2015. **328**. P. 436–443.
13. Huang Y., Bai S., Zhang H. et al. Oxidation of iridium coatings on rhenium substrates at ultrahigh temperature in stagnant air: Its failure mechanism and life model // *Surf. Coat. Technol.* 2016. **288**. P. 52–61.
14. Toenshoff D., Lanam R., Ragaini J. et al. Iridium coated rhenium rocket chambers produced by electroforming // *Proceedings of the 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit.* Las Vegas, NV, USA. July 2000. AIAA 2000–3166.
15. Mefford J., Rong X., Abakumov A. et al. Water electrolysis on La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>CoO<sub>3-δ</sub> perovskite electrocatalysts // *Nat. Commun.* 2016. **7**. P. 11053.
16. Bernt M., Siebel A., Gasteiger H.A. Analysis of voltage losses in PEM water electrolyzers with low platinum group metal loadings // *J. Electrochem. Soc.* 2018. **165**. F305–F314.
17. Millet P., Mbemba N., Grigoriev S.A. et al. Electrochemical performances of PEM water electrolysis cells and perspectives // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2011. **36**. P. 4134–4142.
18. Bernt M., Hartig-Weiß A., Tovini M.F. et al. Current challenges in catalyst development for PEM water electrolyzers // *Chemie-Ingenieur-Technik.* 2020. **92**. P. 31–39.
19. Isakov A.V., Apisarov A.P., Nikitina A.O. Electrowinning and annealing of Ir–Re–Ir material // *Nonferrous metals.* 2017. **11**. P. 55–60.
20. Салтыкова Н.А., Печорская Л.С., Барабошкин А.Н. и др. Солевая пассивация при анодном растворении иридия в хлоридных расплавах // *Электрохимия.* 1986. **22**. С. 579–584.
21. Weiland R., Lupton D.F., Fischer, B. et al. High-temperature mechanical properties of the platinum group metals // *Platinum Met. Rev.* 2006. **50**. № 4. P. 158–170.
22. Докашенко С.И., Степанов В.П., Кириллова Е.В. Импеданс границы раздела поликристаллического золота с расплавленным хлоридом калия // *Расплавы.* 2004. **4**. С. 47–61.
23. Iridium: compounds information // URL: <https://www.webelements.com/iridium/compounds.html>.
24. Stepanov V.P., Dokashenko S.I., Kirillova E.V. Frequency dependence of potentials of minimum capacitance for electrodes of copper subgroup metals in alkali halide melts // *Russ. J. Electrochem.* 2012. **48**. P. 1005–1010.
25. Kirillova E.V. Capacitance and impedance of rhenium in molten alkali metal chlorides // *Russian Metallurgy.* 2018. № 2. P. 123–127.

## CAPACITANCE AND IMPEDANCE OF IRIIDIUM ELECTRODE IN MOLTEN ALKALI CHLORIDES

E. V. Kirillova

*Institute of High-Temperature Electrochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia*

Capacitance of the iridium electrode was studied by the electrochemical impedance spectroscopy with variation of the main physical and chemical parameters: electrical potential,



temperature, radius of the alkali cation. The influence of the signal frequency used in AC electrochemical methods on the capacitance value and the shape of the curve was also checked. Capacitance of the iridium electrode was obtained in molten sodium, potassium and cesium chlorides in the temperature range 1093–1123 K and the frequency range of the AC signal  $3 \cdot 10^0$ – $3 \cdot 10^4$  Hz in the entire accessible range of electrical polarization. The obtained capacitance curves have two main minima with a maximum between them. One of these minima (cathodic one) was identified as the classical potential of minimum capacitance. A decrease in the signal frequency and the temperature of experiment, as well as an increase in the cation radius in the NaCl–KCl–CsCl order, leads to the appearance of one or two additional minima in the potential region between the main minima. The depth of these intermediate minima increases and their potential shifts in the positive direction with an increase in the radius of the alkali metal cation of the salt electrolyte. The calculated values of the capacitance of the electrical double layer and the adsorption capacitance were obtained by the method of equivalent electrical circuits. One of the additional minima obtained by direct measurement of the dependence of the electrode capacitance on the potential at a high AC frequency corresponds to the calculated capacitance of the double layer. The other additional minimum obtained at a low AC frequency corresponds to the calculated adsorption capacitance.

*Keywords:* iridium, alkali chlorides, capacitance, potential of minimum capacitance, adsorption

## REFERENCES

1. Kataliz v promyshlennosti [Catalysis in industry]. Ed. B. Leach. M.: Mir, 1986. [In Russian].
2. Zheng J., Sheng W., Zhuang Z., Xu B., Yan Y. Universal dependence of hydrogen oxidation and evolution reaction activity of platinum-group metals on pH and hydrogen binding energy // *Sci. Adv.* 2016. **2**. e1501602.
3. Rasten E., Hagen G., Tunold R. Electrocatalysis in water electrolysis with solid polymer electrolyte // *Electrochim. Acta.* 2003. **48**. P. 3945–3952.
4. Huang Y., Wu K., Hao R. et al. Iridium doping boosting the electrochemical performance of lithium-rich cathodes for li-ion batteries // *ACS Appl. Energy Mater.* 2021. **4**. № 3. P. 2489–2495.
5. Lin F., Bachman B.F., Boettcher Sh.W. Impact of Electrocatalyst Activity and Ion Permeability on Water-Splitting Photoanodes // *J. Phys. Chem. Lett.* 2015. **6**. P. 2427–2433.
6. Bause S., Decker M., Gerlach F. et al. Development of an iridium-based pH sensor for bioanalytical applications // *J. Solid State Electrochem.* 2018. **22**. P. 51–60.
7. Audichon T., Mayousse E., Morisset S. et al. Electroactivity of RuO<sub>2</sub>–IrO<sub>2</sub> mixed nanocatalysts toward the oxygen evolution reaction in a water electrolyzer supplied by a solar profile // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2014. **39**. P. 16785–16796.
8. Papaderakis A., Tsiplakides D., Balomenou S. et al. Electrochemical impedance studies of IrO<sub>2</sub> catalysts for oxygen evolution // *J. Electroanal. Chem.* 2015. **757**. P. 216–224.
9. Izotopy: svoystva, polucheniye, primeneniye [Isotopes: properties, production, application] / Ed. Y. Baranova. M.: FIZMATLIT, 2005. [In Russian].
10. Wu W., Chen Z., Wang, L. Oxidation behavior of multilayer iridium coating on niobium substrate. // *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2015. **51**. P. 607–612.
11. Zhu L., Bai S., Zhang H. et al. Long-term high-temperature oxidation of iridium coated rhenium by electrical resistance heating method // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2014. **44**. P. 42–48.
12. Huang Y., Bai S., Zhang H. et al. Oxidation of iridium coating on rhenium coated graphite at elevated temperature in stagnated air // *Appl. Surf. Sci.* 2015. **328**. P. 436–443.
13. Huang Y., Bai S., Zhang H. et al. Oxidation of iridium coatings on rhenium substrates at ultrahigh temperature in stagnant air: Its failure mechanism and life model // *Surf. Coat. Technol.* 2016. **288**. P. 52–61.
14. Toenshoff D., Lanam R., Ragaini J. et al. Iridium coated rhenium rocket chambers produced by electroforming // *Proceedings of the 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit.* Las Vegas, NV, USA. July 2000. AIAA 2000–3166.
15. Mefford J., Rong X., Abakumov A. et al. Water electrolysis on La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>CoO<sub>3-δ</sub> perovskite electrocatalysts // *Nat. Commun.* 2016. **7**. P. 11053.
16. Bernt M., Siebel A., Gasteiger H.A. Analysis of voltage losses in PEM water electrolyzers with low platinum group metal loadings // *J. Electrochem. Soc.* 2018. **165**. F305–F314.
17. Millet P., Mbemba N., Grigoriev S.A. et al. Electrochemical performances of PEM water electrolysis cells and perspectives // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2011. **36**. P. 4134–4142.

18. Bernt M., Hartig-Weiß A., Tovini M.F. et al. Current challenges in catalyst development for PEM water electrolyzers // *Chemie-Ingenieur-Technik*. 2020. **92**. P. 31–39.
19. Isakov A.V., Apisarov A.P., Nikitina A.O. Electrowinning and annealing of Ir–Re–Ir material // *Nonferrous metals*. 2017. **11**. P. 55–60.
20. Saltykova N.A., Pechorskaya L.S., Baraboshkin A.N. Solevaya passivatsiya pri anodnom rastvorenii iridiya v khlordnykh rasplavakh [Salt passivation during anodic dissolution of iridium in chloride melts] // *Elektrokhimiya*. 1986. **22**. P. 579–584. [In Russian].
21. Weiland R., Lupton D.F., Fischer, B. et al. High-temperature mechanical properties of the platinum group metals // *Platinum Met. Rev.* 2006. **50**. № 4. P. 158–170.
22. Dokashenko S.I., Stepanov V.P., Kirillova E.V. [Impedance of the interface between polycrystalline gold and molten potassium chloride] // *Rasplavy*. 2004. **4**. P. 47–61. [In Russian].
23. Iridium: compounds information // URL: <https://www.webelements.com/iridium/compounds.html>.
24. Stepanov V.P., Dokashenko S.I., Kirillova E.V. Frequency dependence of potentials of minimum capacitance for electrodes of copper subgroup metals in alkali halide melts // *Russ. J. Electrochem.* 2012. **48**. P. 1005–1010.
25. Kirillova E.V. Capacitance and impedance of rhenium in molten alkali metal chlorides // *Russian Metallurgy*. 2018. № 2. P. 123–127.