

## Анодное поведение In- и In-Bi-электродов в хлоридных и перхлоратных электролитах

<sup>1</sup>Буркитбаева Б.Д., <sup>1</sup>Аргимбаева А.М.,  
<sup>1</sup>Рахымбай Г.С.\*, <sup>1</sup>Авчукир Х.,  
<sup>1</sup>Бейсенова Г.С., <sup>2</sup>Вакандио Ф.,  
<sup>1</sup>Тухметова Д.Б.

<sup>1</sup>Казахский национальный университет  
им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан  
<sup>2</sup>Экс-Марсель университет,  
Марсель, Франция  
\*E-mail: Gulmira.Rakhymbay@kaznu.kz

Работа посвящена изучению коррозионного поведения индиевого и висмутсодержащего индиевого электродов, используемых в процессе электрохимического рафинирования индия. Получены коррозионные диаграммы для обоих электродов в хлоридных и перхлоратных электролитах различного состава при варьировании значений pH и температуры растворов, из которых рассчитаны значения скоростей ионизации индия. Скорость коррозии индия в хлоридных и перхлоратсодержащих хлоридных электролитах значительно выше, чем в перхлоратных, что объясняется активирующим действием хлорид-ионов и большей устойчивостью хлоридных комплексов индия. С увеличением pH раствора в исследуемых электролитах происходит значительное увеличение скорости окисления индия, что объясняется, по-видимому, участием гидроксид-ионов в процессах образования комплексов металла с компонентами электролита, приводящим к увеличению их прочности. На основании полученных коррозионных диаграмм черногового индия в электролитах различного состава при варьировании температуры рассчитаны значения энергии активации исследуемого процесса, свидетельствующие о диффузионной природе окисления индия в хлоридных и перхлоратсодержащих хлоридных растворах и кинетическом характере этой реакции в перхлоратсодержащих электролитах. Анализ найденных значений энергии активации процесса ионизации индиевого и модифицированного висмутом индиевого электродов показал, что депрессорная добавка не оказывает влияния на природу лимитирующей стадии процесса.

**Ключевые слова:** индиевый электрод; модифицированный висмутом In-электрод; коррозия; скорость коррозии; энергия активации; лимитирующая стадия; депрессорная добавка.

## Хлорид және перхлорат ерітінділеріндегі In-мен In-Bi-электродтарының анодтық қасиеті

<sup>1</sup>Буркитбаева Б.Д., <sup>1</sup>Аргимбаева А.М.,  
<sup>1</sup>Рахымбай Г.С.\*, <sup>1</sup>Авчукир Х.,  
<sup>1</sup>Бейсенова Г.С., <sup>2</sup>Вакандио Ф.,  
<sup>1</sup>Тухметова Д.Б.

<sup>1</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық  
университеті, Алматы қ., Қазақстан  
<sup>2</sup>Экс-Марсель университеті,  
Марсель, Франция  
\*E-mail: Gulmira.Rakhymbay@kaznu.kz

Жұмыс индий рафинирлеу процесінде қолданылатын индий және құрамында висмут бар индий электродтарының коррозиялық қасиеттерін зерттеуге арналған. Екі электрод үшін түрлі құрамдағы хлорид және перхлорат ерітінділерінде pH мәндерінің және ерітінді температурасының өзгерісінде коррозиялық диаграммалар алынып, индийдің иондану жылдамдықтары есептелді. Индийдің коррозия жылдамдығы перхлоратты электролиттерге қарағанда хлоридті және перхлоратқұрамды хлоридті ерітінділерде айтарлықтай жоғары, ол хлорид иондарының активтеу әсерімен және индийдің хлоридті комплекстерінің жоғары тұрақтылығымен түсіндіріледі. Ерітіндінің pH мәні жоғарлауымен зерттелетін электролиттерде индийдің еру жылдамдығының өсуін, металдың электролит компоненттерімен комплекс түзу процесіне гидроксил иондары қатысып, олардың беріктігінің арттырумен түсіндіруге болады. Қаралашты индий үшін әр түрлі құрамдағы электролиттерде температураның өзгеру жағдайында алынған коррозиялық диаграммалар негізінде зерттеліп отырған процестің активтену энергия мәндері есептелді. Бұл мәндер индий тотығу процесінің хлоридті және перхлоратқұрамды хлоридті ерітінділерде табиғаты диффузиялық, ал перхлоратты электролиттерде берілген реакцияның кинетикалық сипатын дәлелдейді. Индий және құрамында висмут бар индий электродтарының иондану процесінің табылған активтену энергия мәндері депрессорлы қоспаның процестің лимиттеуші сатысының табиғатына ешқандай әсер етпейтінін көрсетті.

**Түйін сөздер:** индий электроды; висмутпен модифицирленген In-электроды; коррозия; коррозия жылдамдығы; активтену энергиясы; лимиттеуші саты; депрессорлы қоспа.

## Anodic behavior of In- and In- Bi-electrode in chloride and perchlorate electrolytes

<sup>1</sup>Burkitbayeva B.D., <sup>1</sup>Argimbayeva A.M.,  
<sup>1</sup>Rakhymbay G.S.\*, <sup>1</sup>Avchukir Kh.,  
<sup>1</sup>Beisenova G.S., <sup>2</sup>Vacandio F.,  
<sup>1</sup>Tukhmetova D.B.

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University,  
Almaty, Kazakhstan  
<sup>2</sup>Aix-Marseille University, Marseille, France  
\*E-mail: Gulmira.Rakhymbay@kaznu.kz

The work is devoted to the study of the corrosion behavior of indium and modified bismuth-indium electrodes used in the electrochemical refining of indium. Corrosion diagrams for both electrodes in chloride and perchlorate electrolytes of different compositions have been obtained by varying the pH and temperature of the solution and the ionization rates of indium have been calculated. Rate of corrosion reaction of indium in chloride and perchlorate containing chloride solutions is higher than the rate in perchlorate solutions, due to the activating action of chloride ions and greater stability of chloride complexes of indium. The higher the pH of the solution, the higher the oxidation rate of indium is. It can be explained, apparently, by participation of hydroxyl ions in the formation of metal complexes with components in electrolyte, which leads to increase of their stability. Based on the corrosion diagrams of rough indium in electrolytes of different compositions by varying the temperature, the values of the activation energy of the studied process, indicating the diffusion nature of indium oxidation in chloride and perchlorate-containing chloride solutions and the kinetic nature of this reaction in perchlorate electrolytes. Analysis of values of activation energy of ionization of indium and modified bismuth-indium electrodes showed that depressant additive does not influence the nature of the rate-limiting step of the process.

**Keywords:** indium electrode; modified bismuth-indium electrode; corrosion; corrosion rate; activation energy; diffusion; limiting stage; depressor additive.



## Анодное поведение In- и In-Bi-электродов в хлоридных и перхлоратных электролитах

<sup>1</sup>Буркитбаева Б.Д., <sup>1</sup>Аргимбаева А.М., <sup>1</sup>Рахымбай Г.С.\*, <sup>1</sup>Авчукир Х., <sup>1</sup>Бейсенова Г.С.,  
<sup>2</sup>Вакандио Ф., <sup>1</sup>Тухметова Д.Б.

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Экс-Марсель университет, Марсель, Франция

\*E-mail: Gulmira.Rakhymbay@kaznu.kz

### 1. Введение

Индий – один из редких металлов, обладающий высоким водородным перенапряжением и коррозионной стойкостью. Особо важным является применение индия и его соединений в электронной и оптоэлектронной промышленности, в частности, при производстве жидкокристаллических дисплеев и солнечных батарей [1-5]. Индий является одной из составляющих бинарных (Al-In, Bi-In), троичных (Al-Sb-In) и четвертичных (Cd-Ge-Sn-In) сплавов, повышающей их прочность, твердость и коррозионную стойкость [6]. Использование алюминия в качестве жертвенного анода при катодной защите ограничено присутствием оксидной пленки на поверхности алюминия в водных растворах и его локальной коррозией в галоидсодержащей среде [7]. Для увеличения скорости растворения алюминия проводят его легирование с получением сплава Al-Zn-In, обладающего рядом преимуществ. Этот сплав алюминия меньше загрязняет морскую воду, чем ртутьсодержащий, и легче подвергается термической обработке в сравнении с оловосодержащими сплавами. Авторами этого исследования было установлено, что более высокие температуры создают лучшие условия для получения однородных структур, обеспечивающих оптимальную эффективность анодов. Практические применения индия часто связаны с щелочными электролитами. В работе [8] методом снятия поляризационных кривых установлено образование и рост оксидной пленки на поверхности индиевого электрода в боратном буферном растворе. Найдено, что снижение концентрации тетрабората натрия в электролите, pH раствора и температуры способствует образованию пассивной оксидной пленки на поверхности электрода. Тогда как

увеличение этих параметров ведет к росту плотности тока коррозии. Рассчитанные значения энергии активации свидетельствуют о росте оксидной пленки, контролируемом диффузией. Добавки в электролит хлорида, бромиды и иодида натрия в больших концентрациях приводят к растворению пассивной оксидной пленки и увеличению скорости коррозии индиевого электрода.

Изучено анодное поведение индия в растворе гидроксида калия методами рентгеновской дифракции и циклической вольтамперометрии на платиновом и вращающемся платиновом электроде с кольцом, что обусловлено использованием индия в щелочных цинковых батареях [9-11]. Установлено, что в концентрированном щелочном растворе этот процесс состоит из двух стадий: активации и пассивации. В области активации основным продуктом является трехвалентный индий, который в результате диспропорционирования превращается в  $\text{InOH}_{ad}$ . Вторая стадия сопровождается образованием гидроксида индия ( $\text{In}(\text{OH})_3$ ) на поверхности электрода, приводящим к его пассивации. Затем гидроксид индия окисляется до более стабильного  $\text{In}_2\text{O}_3$ , предотвращающего дальнейшее окисление индия [12].

Необходимость очистки черного индия, производимого в Казахстане, связана с отсутствием технологий рафинирования этого металла в нашей Республике. С целью оптимизации условий электрохимического рафинирования индия в предшествующей работе [13] представлены результаты коррозионного поведения индия в хлоридных и сульфатных электролитах, а в настоящей изучен процесс окисления индиевого электрода в перхлоратных и в перхлоратсодержащих хлоридных растворах.

## 2. Экспериментальная часть

Все электрохимические измерения проведены с использованием потенциостата-гальваностата Autolab PGSTAT 302N (Нидерланды). Электрохимическая ячейка для проведения исследований состояла из индиевого чернового анода (марки ИН-2), платинового катода и хлоридсеребряного электрода сравнения. В некоторых опытах анодом служил черновой индий, содержащий висмут в качестве депрессорной добавки. Для осуществления добавки висмута в черновой индий получен сплав индий-висмут при соотношении, соответствующем минимальной температуре плавления, определенной из диаграммы плавкости этого сплава. Масса добавки составляла пятую часть от массы примесных металлов. Черновой индий марки ИН-2 содержит 0,02 масс.% примесных металлов. Подготовка поверхности анода осуществлялась механически с использованием микронной шкурки и ополаскиванием бидистиллированной водой перед каждым измерением. Поверхность платинового электрода очищалась погружением его в раствор азотной кислоты (1:1).

Коррозионное поведение индия изучено в хлоридных (ХЭ), перхлоратсодержащих хлоридных (ПХЭ) и перхлоратных (ПЭ) электролитах следующего состава:  $0,1M \text{In}(\text{ClO}_4)_3 + 1M \text{NaClO}_4$ ;  $0,1M \text{In}(\text{ClO}_4)_3 + 1M \text{NaCl}$ ;  $0,1M \text{InCl}_3 + 1M \text{NaCl}$ . Количественное соотношение катионов бинарных электролитов оставалось неизменным, лишь в перхлоратсодержащем хлоридном электролите соотношение содержания перхлорат- и хлорид-ионов составляло 1/3. Варьирование pH растворов осуществляли добавлением HCl или NaOH для хлоридного электролита и  $\text{HClO}_4$  и NaOH для перхлоратных электролитов. В работе использованы реактивы марки «хч».

Экспериментальные исследования проводились с варьированием следующих параметров: состава электролита, температуры и pH раствора. Для нахождения скорости коррозии индиевого электрода проведены потенциодинамические измерения в различных растворах, позволившие определить токи растворения индия и потенциал коррозии. С целью определения воспроизводимости результатов проводились повторные потенциодинамические измерения. Полученные экспериментальные результаты были обработаны с использованием программы NOVA 10,5, разработанной для управления потенцио/гальваностатом Autolab, и определены значения скоростей ионизации индия. Для исследования коррозионных процессов использован поляризационный метод с линейной разверткой потенциала. Поляризация осуществлялась в интервале потенциалов  $\text{Ест.} \pm 300 \text{ мВ}$ , начиная с катодной области. Скорость развертки потенциала составляла 2 мВ/с.

## 3. Результаты и обсуждение

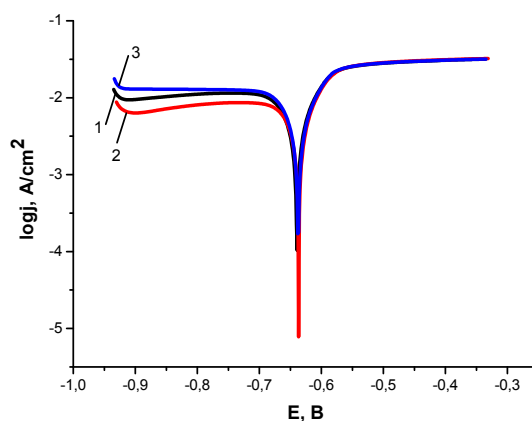
Скорость коррозии металлов, как известно, зависит от водородного показателя pH раствора. Существует определенное значение pH раствора для каждого металла,

при котором наблюдается минимальная скорость его растворения, обусловленная пассивацией его поверхности. В некоторых случаях зависимость скорости коррозии металла от pH растворов осложняется протеканием либо сопряженным процессом образования труднорастворимых защитных пленок, либо пассивированием поверхности металла. Для скорости электрохимической коррозии металлов в кислых растворах существенное значение имеют величины pH и природа кислоты. Этим и объясняется изучение коррозионного поведения индия в электролитах с различными значениями кислотности среды.

Отдельно полученные анодные и катодные поляризационные кривые не описывают скорость коррозионного процесса. Поэтому анализ коррозионных систем принято проводить с помощью диаграмм, которые отражают кинетику анодной и катодной реакций. Получены коррозионные диаграммы Эванса для индия в хлоридных, перхлоратсодержащих хлоридных и перхлоратных растворах, pH которых варьировали в интервале 1,5-2,5 (рисунки 1, 2). Этот интервал выбран сравнительно малым из-за образования гидроксида индия при дальнейшем повышении pH.

Из потенциодинамических измерений найдены значения скоростей ионизации индия в электролитах различного состава при варьировании pH раствора (таблица 1).

Анализ полученных результатов свидетельствует о существенном влиянии pH среды на скорость анодного растворения индия в исследованных электролитах. Надо отметить, что в перхлоратных электролитах незначительное изменение pH раствора ведет к значительному увеличению скорости коррозии индия. С увеличением pH раствора в хлоридных и перхлоратных электролитах скорость ионизации индия возрастает из-за участия гидроксид-ионов в процессах образования комплексов металла с компонентами электролита, приводящего к увеличению прочности этих комплексов. Аномальная зависимость

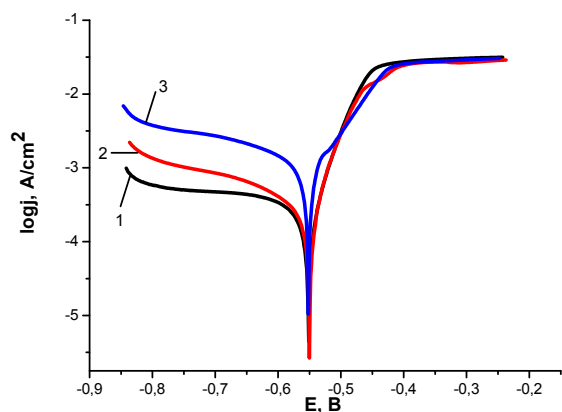


1 – pH=1,5; 2 – pH=2,0; 3 – pH=2,5;

**Рисунок 1** – Коррозионные диаграммы чернового индия в перхлоратсодержащем хлоридном электролите при различных значениях pH

**Таблица 1** – Скорость коррозии индия в ХЭ, ПХЭ и ПЭ при различных значениях pH раствора

Электролит	Скорость коррозии (мм/год)		
	pH= 1,5	pH= 2,0	pH= 2,5
0,1M $\text{In}(\text{ClO}_4)_3 + 1\text{M NaClO}_4$	4,00	5,65	96,98
0,1M $\text{In}(\text{ClO}_4)_3 + 1\text{M NaCl}$	824,01	578,56	892,83
0,1M $\text{InCl}_3 + 1\text{M NaCl}$	513,23	562,79	798,49



1 – pH=1,5; 2 – pH=2,0; 3 – pH=2,5;

**Рисунок 2** – Коррозионные диаграммы черногого индия в перхлоратном электролите при различных значениях pH

скорости растворения индия в перхлоратсодержащих хлоридных электролитах объясняется, по-видимому, изменением устойчивости образующихся комплексных частиц сложного состава. Скорость коррозии индия в хлоридных электролитах значительно выше, чем в перхлоратных. Меньшие значения скорости окисления индия в перхлоратных электролитах, по-видимому, объясняются отсутствием активирующего влияния хлорид-ионов на коррозию индия. В кислых растворах хлорид-ионы специфически адсорбируются на поверхности индиевого электрода, что подтверждено квантовохимическими расчетами [14]. Согласно исследованиям Я.М. Колотыркина, электрохимические реакции ионизации атомов металла, как правило, включают стадию химического или адсорбционно-химического взаимодействия поверхностных атомов металла с составляющими среды. Такое взаимодействие приводит к образованию устойчивых или промежуточных комплексов металла с компонентами раствора непосредственно в электрохимической стадии. Все эти процессы оказывают определяющее влияние на скорость растворения металла. Частицы, адсорбированные на металле, могут тормозить или стимулировать растворение металла, что определяется соотношением прочностей связи адсорбированного компонента с металлом и с сольватирующими его молекулами. Частицы проявляют ускоряющее действие на растворение металла, когда они достаточно прочно

связаны и с металлом, и с раствором. В случае, когда связь адсорбирующихся частиц с сольватной оболочкой слабая, а с металлом прочная, они остаются на поверхности металла и замедляют его растворение.

Скорость электрохимического процесса характеризуется плотностью тока, поэтому определение влияния температуры на скорость коррозионного процесса сводится к исследованию зависимости плотности тока коррозии от температуры.

Влияние температуры на процесс окисления индиевого электрода в различных электролитах установлено из коррозионных измерений в определенном интервале температур (рисунки 3-5).

Результаты свидетельствуют об увеличении скорости катодного и анодного процессов в случае окисления индия в перхлоратных электролитах (рисунок 3). В случае хлоридных и перхлоратсодержащих растворов повышение температуры заметно ускоряет катодный процесс и не влияет на скорость анодной реакции (рисунки 4, 5).

Зависимость коррозионного поведения индия от температурного фактора представлена на рисунке 6. Присутствие перхлората в хлоридном электролите незначительно ускоряет растворение индия.

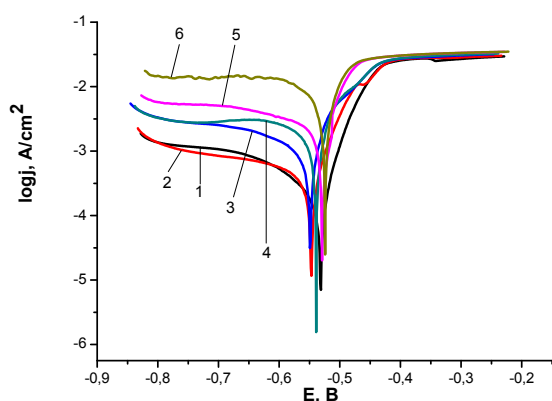
Для количественной оценки скорости коррозии индия в различных электролитах при варьировании температуры проведены расчеты скорости коррозии индия (таблица 2) на основе коррозионных диаграмм, представленных на рисунках 3-5.

Видно, что самая высокая скорость коррозии индиевого электрода наблюдается в хлоридных перхлоратсодержащих электролитах. Повышение температуры ведет к увеличению скорости растворения индия в хлоридных и перхлоратных электролитах, причем влияние температуры в перхлоратных электролитах значительно сильнее, чем в хлоридных.

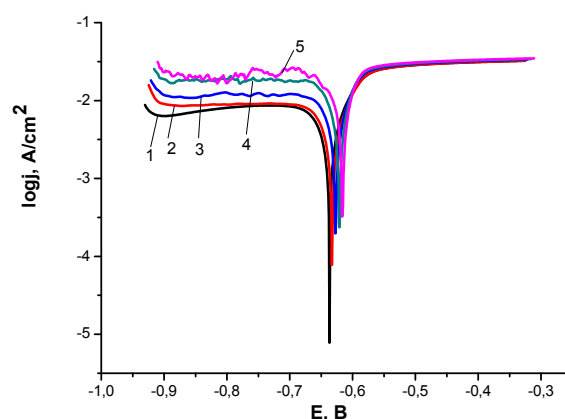
Для эффективной очистки черногого индия был использован метод реакционного электролиза. Суть этого способа заключается в модифицировании состава анодного материала путем добавок некоторых химических элементов, которые, взаимодействуя с металлами-примесями, переводят их в электрохимически неактивное состояние. В этой работе в качестве такой добавки использован висмут. Содержание висмута в рафинируемом индии составляло 0,3%, что в 5-10 раз превышало суммарное содержание примесных металлов.

**Таблица 2** – Скорость коррозии индия в электролитах различного состава при варьировании температуры.

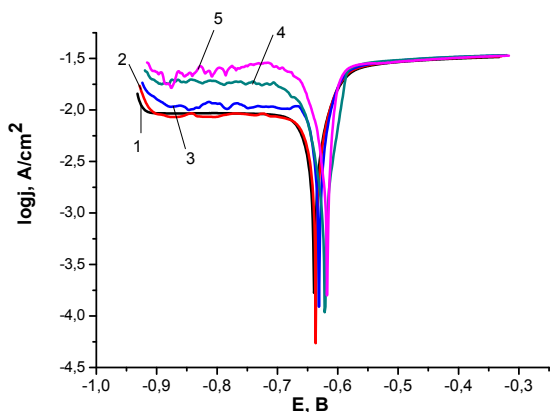
T, °C	Скорость коррозии (мм/год)		
	0,1M In(ClO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> +1M NaClO <sub>4</sub>	0,1M In(ClO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> +1M NaCl	0,1M InCl <sub>3</sub> +1M NaCl
30	9,41	578,56	452,73
40	28,88	656,79	598,45
50	66,27	1092,20	670,51
60	71,97	1233,00	844,99
70	675,32	1485,90	1172,30

**Таблица 3** – Значения энергии активации анодного растворения индиевого и висмутсодержащего индиевого электродов в

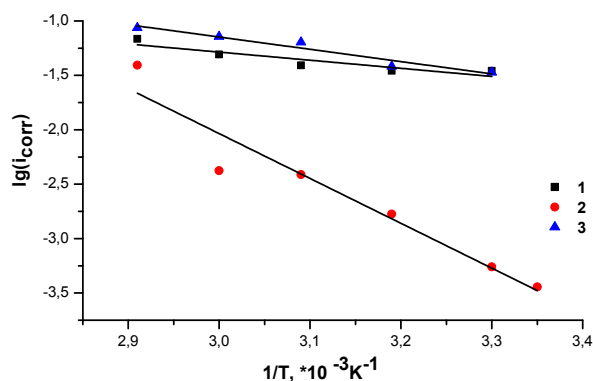
1 – 25°C; 2 – 30°C; 3 – 40°C; 4 – 50°C; 5 – 60°C; 6 – 70°C;

**Рисунок 3** – Коррозионные диаграммы индия в перхлоратном растворе при различных температурах

1 – 30°C; 2 – 40°C; 3 – 50°C; 4 – 60°C; 5 – 70°C;

**Рисунок 4** – Коррозионные диаграммы индия в перхлоратсодержащем хлоридном растворе при различных температурах

1 – 30°C; 2 – 40°C; 3 – 50°C; 4 – 60°C; 5 – 70°C;

**Рисунок 5** – Коррозионные диаграммы индия в хлоридном растворе при различных температурах

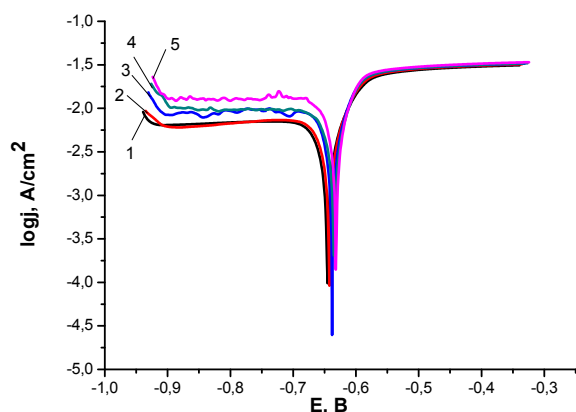
1 – ХЭ, 2 – ПЭ, 3 – ПХЭ

**Рисунок 6** – Зависимость логарифма плотности тока коррозии от обратного значения температуры

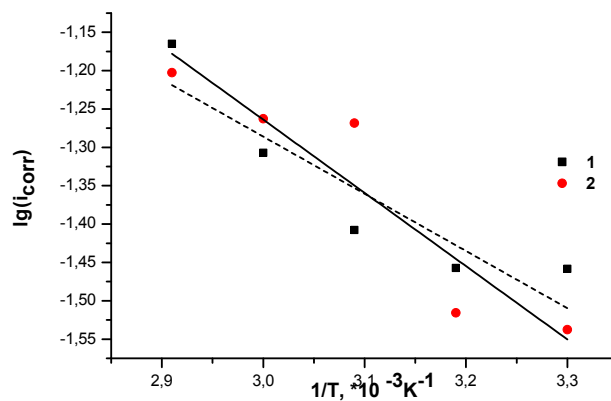
Влияние различных факторов – природы электролита, температуры и pH раствора – изучено для индиевого электрода, содержащего висмут. Надо отметить, что добавки висмута незначительно снижают скорость коррозии индия при различных температурах в хлоридных электролитах (рисунок 7), тогда как при

варьировании pH электролита влияние висмута не наблюдается.

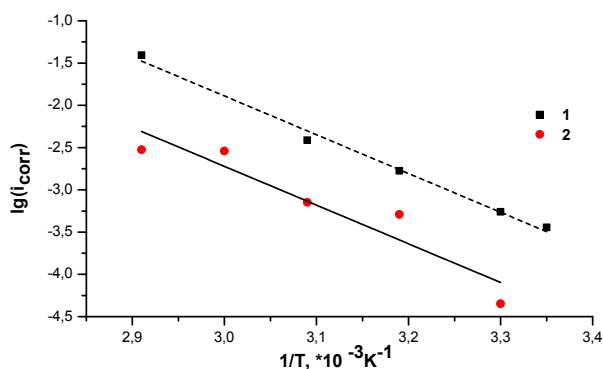
В перхлоратных электролитах добавка висмута в индиевый анод приводит к заметному снижению скорости коррозии электрода при различных температурах (рисунок 8-10).



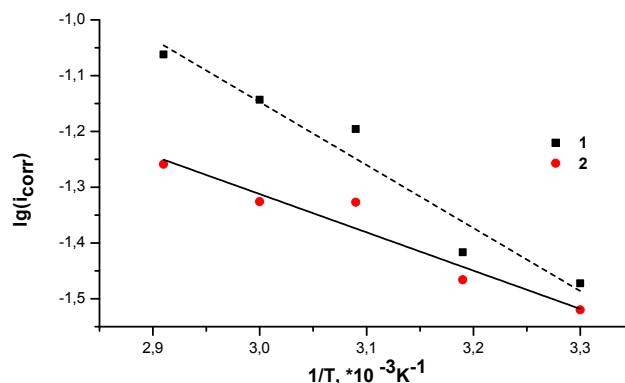
1 – 30°C; 2 – 40°C; 3 – 50°C; 4 – 60°C; 5 – 70°C;

**Рисунок 7** – Коррозионная диаграмма висмутсодержащего индия в хлоридном растворе при различных температурах

1 – In электрод, 2 – In-Bi электрод

**Рисунок 8** – Зависимость логарифма плотности тока коррозии от обратного значения температуры в хлоридном электролите

1 – In электрод, 2 – In-Bi электрод

**Рисунок 9** – Зависимость логарифма плотности тока коррозии от обратного значения температуры в перхлоратном электролите

1 – In электрод, 2 – In-Bi электрод

**Рисунок 10** – Зависимость логарифма плотности тока коррозии от обратного значения температуры в перхлоратсодержащем хлоридном электролите

При концентрационной поляризации или замедленной скорости разряда влияние температуры на плотность тока описывается уравнением, аналогичным по форме уравнению Аррениуса:

$$\lg i = B - E_{\text{эфф.}}/2,3RT \quad (1)$$

Таким образом, между  $\lg i$  и  $1/T$  существует линейная зависимость, которая сохраняется в широком интервале температур [15]. Энергия активации электрохимической реакции находится из величины углового коэффициента прямой, равного  $E/2,3 RT$ .

По графикам, зная  $\lg i$  и тангенс угла наклона (угловой коэффициент) прямой ( $\text{tg} \alpha$ ), находят величину эффективной энергии активации:

$$E_{\text{эфф.}} = 2,3RT \text{tg} \alpha \quad (2)$$

В случае концентрационной или диффузионной поляризации она составляет 8-25 кДж/моль, при замедленном разряде – 40-120 кДж/моль.

С целью определения природы лимитирующей стадии электродного процесса по экспериментальным результатам данного исследования определены значения эффективной энергии активации процесса коррозии индия в электролитах различного состава (таблица 3).

Как видно из полученных результатов, в хлоридных и перхлоратсодержащих электролитах скоростью определяющей стадией процесса является диффузия, а в перхлоратных электролитах коррозия протекает в кинетическом режиме. Эти результаты позволяют управлять скоростью протекающих в системе реакций. Сравнение значений энергии активации для индия и висмутсодержащего индия

электролитах различного состава

Состав электролита	In	In-Bi (w=0,3%)
	$E_a^{\text{корр}}$ , кДж/моль	$E_a^{\text{корр}}$ , кДж/моль
0,1 InCl <sub>3</sub> + 1,0M NaCl	19,63	18,38
0,1 In(ClO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> + 1,0M NaClO <sub>4</sub>	73,30	88,36
0,1 In(ClO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> + 1,0M NaCl	21,82	13,23

свидетельствует о том, что депрессорная добавка не меняет механизма протекающих процессов.

#### 4. Заключение

1. Определена скорость коррозии индиевого и модифицированного висмутом индиевого электродов в хлоридных, перхлоратсодержащих хлоридных и перхлоратных электролитах при варьировании значений pH раствора и температуры.

2. Установлено активирующее влияние хлорид-ионов на скорость окисления индия, а также значительное увеличение скорости коррозии черного индия с уменьшением кислотности среды в хлоридных и перхлоратных электролитах, что объясняется участием гидроксид-ионов в процессах

образования комплексов металла с компонентами электролита.

3. Определена природа лимитирующей стадии процесса окисления индия на основе расчета значений энергии активации исследуемой реакции из коррозионных диаграмм индия в различных электролитах при варьировании температурного фактора. В хлоридных и перхлоратсодержащих хлоридных растворах скорость определяющей стадией является диффузия, а в перхлоратных коррозия протекает в кинетическом режиме.

4. Найдено, что использование модифицированного висмутом индиевого анода в целях повышения очистки черного индия не меняет механизма исследуемого коррозионного процесса.

#### Список литературы

- 1 Li S. T., Qiao X. L., Chen J. G. et al. Microstructure and properties of indium tin oxide thin films deposited by RF-magnetron sputtering // *Rare Metals*. – 2006. – Vol.25, Is.4. – P.359-364.
- 2 Bandara J., Wansapura P.T., Jayatilaka S.P.B. Indium tin oxide coated conducting glass electrode for electrochemical destruction of textile colorants // *Electrochimica Acta*. – 2007. – Vol.52, Is.12. – P.4161-4166.
- 3 Araki N., Obata M., Ichimura A. et al. Redox and photochemical behavior of a porphyrin monolayer on an indium-tin oxide electrode // *Electrochimica Acta*. – 2005. – Vol.51, Is.4. – P. 677-683.
- 4 Zhou H., Li W. Anodic passivation processes of indium in alkaline solution // *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*. – 2005. – Vol.25, Is.1. – P.25-29.
- 5 Morales A. E., Zaldivar M. H., Pal U. Indium doping in nanostructured ZnO through low-temperature hydrothermal process // *Optical Materials*. – 2006. – Vol.29, Is.1. – P.100-104.
- 6 Ozer S., Besicki C. Assessment of InSb photodetectors on Si substrates // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2005. – Vol.36. – P.559-563.
- 7 Keyvani A., Masoud E., Mohsen S. et al. Influence of casting temperature on electrochemical behavior of Al-Zn-In sacrificial anodes // *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*. – 2005. – Vol.24, Is.3. – P.1-8.
- 8 Ahmed Diab, Salah Abd El Wanees. Controlling the passive oxide film formation on indium electrode in Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> solutions // *American Journal of Physical Chemistry*. – 2014. – Vol.3, Is.3. – P.33-40.
- 9 Paramasivam M., Jayachandran M., Venkatakrishna S. Influence of alloying additives on the performance of commercial grade aluminum as galvanic anode in alkaline zincate solution for use in primary alkaline batteries // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 2003. – Vol.33, Is.3. – P.303-309.
- 10 Zein El Abedin S., Saleh A.O. Characterization of some aluminum alloys for application as anodes in alkaline batteries // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 2004. – Vol.34. – P.331-335.
- 11 Perez Martin G., O'Keefe Matthew J. et al. Chemical and morphological analyses of zinc powders for alkaline batteries // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 2007. – Vol.37, Is.2. – P.225-231.
- 12 Hebing Zhou, Mengqing Xu, Qiming Huang et al. Anodic behavior of indium in KOH solution // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 2009. – Vol.39. – P.1739-1744.
- 13 Rakhymbay G., Naurzybayev M.K., Burkitbayeva B.D., Argimbaeva A.M., Kurbatov A.P., Vacandio F. Corrosion of indium in chloride

and sulfate electrolytes // Eurasian Chemico-Technological Journal. – 2014. – Vol.16, Is.4. – P.287-291.

- 14 Малючева О.И. Кинетика и механизм электродных процессов с участием комплексов индия (III). Автореферат на соискание уч. степени кандидата химических наук. – Казань, 1991. – 18 с.
- 15 Кеше Г. Коррозия металлов. Физико- химические принципы и актуальные проблемы. – М.: Metallurgiya, 2004. – 400 с.

#### References

- 1 Li S. T, Qiao X L, Chen J G et al (2006) Rare Metals 25:359-364. [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0521\(06\)60068-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0521(06)60068-5)
- 2 Bandara J, Wansapura P T, Jayathilaka S P B (2007) Electrochim Acta 52:4161-4166. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.electacta.2006.11.036>
- 3 Araki N, Obata M, Ichimura A et al (2005) Electrochim Acta 51:677-683. <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2005.05.030>
- 4 Zhou H, Li W (2005) Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection 25:25-29.
- 5 Morales A E, Zaldivar M H, Pal U (2006) Opt Mater 29:100-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2006.03.010>
- 6 Ozer S, Besikci C (2005) J PHYS D APPL PHYS 36:559-563. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/36/5/321>
- 7 Keyvani A, Masoud E, Mohsen S et al (2005) Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering 24:1-8.
- 8 Ahmed Diab, Salah Abd El Wanees (2014) American Journal of Physical Chemistry 3:33-40. <http://dx.doi.org/10.11648/j.ajpc.20140303.12>
- 9 Paramasivam M, Jayachandran M, Venkatakrishna S (2003) J Appl Electrochem 33:303-309. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1024141918663>
- 10 Zein El Abedin S, Saleh AO (2004) J Appl Electrochem 34:331-335. <http://dx.doi.org/10.1023/B:JACH.0000015611.65219.64>
- 11 Perez Martin G, O'Keefe Matthew J et al (2007) J Appl Electrochem 37:225-231. <http://dx.doi.org/10.1007/s10800-006-9239-3>
- 12 Hebing Zhou, Mengqing Xu, Qiming Huang et al (2009) J Appl Electrochem 39:1739-1744. <http://dx.doi.org/10.1007/s10800-009-9868-4>
- 13 Rakhymbay G, Naurzybayev MK, Burkitbayeva BD, Argimbaeva AM, Kurbatov AP, Vacandio F (2014) Eurasian Chemico-Technological Journal 16:287-291. <http://dx.doi.org/10.18321/ectj7>
- 14 Malyucheva OI (1991) The kinetics and mechanism of electrode processes involving indium complexes (III) [Kinetika i mehanizm elektrodnyih protsessov s uchastiem kompleksov indiya (III)]. Abstract of dissertation for Candidate of Chemical Sciences Degree]. Kazan, Russia. (In Russian)
- 15 Keshe G (2004) Corrosion of metals. Physico-chemical principles and actual problems [Korroziya metallov. Fiziko-himicheskie printsipy i aktualnyie problemy]. Metallurgiya, Moscow, Russia. (In Russian)