

AN ELECTROCHEMICAL METHOD FOR THE REGENERATION OF TRIVALENT IRON TO INCREASE THE EFFICIENCY OF IN-SITU LEACHING OF URANIUM

A. Bayeshov¹, A. Bayeshova², M. Turlybekova^{3*}, B. Myrzabekov⁴

¹ «National Center on Complex Processing of Mineral Raw Materials of the Republic of Kazakhstan», Almaty, Kazakhstan

² Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

³ Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

⁴ D.V. Sokolskiy Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan

*E-mail: m.t.89@mail.ru

Abstract. *Introduction.* Due to the increasing demand for electricity with the development of production and general infrastructure, increasing the production of uranium as an economically and environmentally efficient source of energy is an urgent problem. *The purpose of this study* is to develop an electrochemical method for the regeneration of iron (III) ions used as a uranium oxidizer in the process of in-situ leaching of uranium minerals with sulfuric acid solutions. *Methods.* The mechanism of reactions in the iron (II)-iron (III) redox system was studied by recording potentiodynamic polarization curves and conducting electrolysis of the oxidation of divalent iron ions under galvanostatic conditions. *Results and discussion.* Cathode-anodic and anodic-cathode cyclic polarization curves taken on platinum electrodes showed that the redox reactions of iron ions are reversible and these reactions occur at a slight overvoltage. The influence of the main electrochemical parameters (current density, concentrations of iron (II) ions and sulfuric acid) on the oxidation of divalent iron ions was studied for the first time using granular anode electrodes, the electrode spaces of which are separated by an anionite membrane. It has been found that the use of granular graphite electrodes in the oxidation divalent iron ions increases the current output by more than 2 times compared to a plate graphite electrode. *Conclusion.* According to the results of the study, it was noted that under optimal conditions, the current output of the oxidation of divalent iron ions exceeds 90%. Extensive research has shown that trivalent iron ions, widely used in the in-situ leaching process for uranium production, can be regenerated by electrochemical methods.

Key words: iron (II) ions, oxidation, lump electrode, regeneration, in-situ leaching of uranium

Bayeshov Abduali

Doctor of Chemical Science, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic Kazakhstan; e-mail: bayeshov@mail.ru

Bayeshova Azhar

Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: azhar_b@bk.ru,

Turlybekova Makpal

PhD-doctoral student, research associate, e-mail: m.t.89@mail.ru,

Myrzabekov Bekzat

PhD, Senior researcher, e-mail: myrzabekbegzat@mail.ru

Citation: A. Bayeshov¹, A. Bayeshova², M. Turlybekova^{3*}, B. Myrzabekov. An electrochemical method for the regeneration of trivalent iron to increase the efficiency of in-situ leaching of uranium. *Chem. J. Kaz.*, 2024, 1(85), 142-153. (In Kaz.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2024-1.2710-1185.14>

УРАН ӨНДІРІСІНДЕГІ ЖЕРАСТЫ ШАЙМАЛАУ ПРОЦЕСІНІҢ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҮШІН ҮШВАЛЕНТТІ ТЕМІРДІ ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУДІҢ ЭЛЕКТРОХИМИЯЛЫҚ ӘДІСІ

А. Баешов¹, А. К.Баешова², М.Н.Турлыбекова^{3*}, Б.Э.Мырзабеков⁴

¹«Қазақстан Республикасының минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу жөніндегі ұлттық орталығы», Алматы, Қазақстан

² әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

³ Абай атындағы Қазақ Ұлттық педогогикалық Университеті, Алматы, Қазақстан

⁴Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты, Алматы, Қазақстан

*E-mail: m.t.89@mail.ru

Түйіндемe. *Кіріспе.* Өндіріс пен жалпы инфрақұрылымның дамуымен электр энергиясына деген қажеттіліктің артуына байланысты энергия мөлшері көп, экономикалық, экологиялық тиімді энергия көзі ретінде уран өндірісін арттыру ақтуалды мәселе болып отыр. *Жұмыс мақсаты* – уран минералдарын күкірт қышқылды ерітінділермен жерасты шаймалау процесінде уран тотықтырғышы ретінде қолданылатын темір (III) иондарын регенерациялаудың электрохимиялық әдісін жасау. *Әдістер.* Темір (II)-темір (III) тотығу-тотықсыздану жүйесіндегі реакциялардың жүру механизмі потенциодинамикалық поляризациялық қисықтар түсіру және екі валентті темір иондарының тотығуын гальваностатикалық жағдайда электролиз жүргізу арқылы зерттелді. *Нәтижелер және талқылау.* Платина электродтарында түсірілген катодты-анодты және анодты-катодты циклді поляризациялық қисықтар темір иондарының тотығу-тотықсыздану реакцияларының қайтымды екенін және бұл реакциялардың көп емес аса кернеулікпен жүретіндігін көрсетті. Электродтық кеңістіктері анионитті мембранамен бөлінген, түйіршікті анод электродтарын қолдану арқылы екі валентті темір иондарының тотығуына негізгі электрохимиялық параметрлердің (ток тығыздығы, темір (II) иондарының және күкірт қышқылының концентрациясы) әсері алғаш рет зерттелді. Екі валентті темір иондарын тотықтыруда түйіршікті графит электродтарын қолдану пластиналы графит электродпен салыстырғанда ток бойынша шығымды 2 еседен аса арттыратыны анықталды. *Тұжырым.* Зерттеу нәтижелерінен оптималды жағдайда екі валентті темір иондарының тотығуының ток бойынша шығымы 90 % жоғары болатындығы байқалды. Жан-жақты зерттеу жұмыстарының нәтижесінде уран өндірісінде жерасты шаймалау процесінде кеңінен қолданылып жүрген үш валентті темір иондарын электрохимиялық әдістер арқылы регенерациялауға болатындығы көрсетілді.

Кілт сөздер: темір (II) иондары, тотығу, түйіршікті электрод, регенерация, уранды жерасты шаймалау.

<i>Баешов Абдуали</i>	<i>Химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі</i>
<i>Баешова Ажар Коспановна</i>	<i>Техника ғылымдарының докторы, профессор</i>
<i>Турлыбекова Макпал Нышанғалиевна</i>	<i>докторант, ғылыми қызметкер</i>
<i>Мырзабеков Бекзат</i>	<i>PhD, аға ғылыми қызметкер</i>

1. Кіріспе

Заманауи цивилизацияны электр энергиясыз елестету мүмкін емес. Өндіріс пен жалпы инфрақұрылымның дамуына байланысты электр энергиясына деген қажеттілік артуда. Бұл өз кезегінде жылдан жылға электр энергиясын көптеп өндіруге, сәйкесінше, оны өндіруге қолданылатын жанғыш пайдалы қазбалар кен орындарының қорының кедейленуіне және үлкен экологиялық шығындарға әкеліп соғуда.

Ядролық реакциялардан бөлінетін энергия мөлшері қарапайым химиялық реакцияларға (мысалы, жану реакциясы) қарағанда миллиондаған

есе жоғары. Оның үстіне, атом электр станциясының (АЭС) жылу электр станцияларынан (ЖЭС) көптеген экологиялық, экономикалық артықшылықтары бар. Сондықтан бүгінде уран өндірісінің қарқынды дамуына, соның ішінде, уранды минералдардан мейлінше жоғары мөлшерде өндіруге бағытталған тиімді әдістерді жасауға әкеліп отыр.

Жерасты шаймалау әдісімен игерілетін кен орындарында кездесетін уран минералдары негізінен уран тотықтары (настуран, уран қарасы) мен силикаттары (коффинит) болып табылады. Бұл минералдар құрамындағы уран төртвалентті (тотықсызданған) күйде болады [1-3].

Уран кен орындарын күкірт қышқылды ерітінділермен жерасты шаймалау кезінде ерітіндіден уранды бөліп алу оның жоғары тотығу дәрежесіне өтуіне байланысты қиындықтар тудырады. Бұл жағдайда шаймалау ерітінділерінің тотығу-тотықсыздану потенциалы (ТТП) мәні үлкен рөл атқарады. Іс жүзінде тотықтырғыштар ретінде H_2O_2 , O_2 , MnO_2 , $KMnO_4$, $K_3[Fe(CN)_6]$, $NaNO_2$, Fe^{3+} тұздары қолданылады [4]. Бұл тотықтырғыштардың кейбіреулерін қолдану олардың қымбаттылығына және тапшылығына байланысты, сондай-ақ, регенерациялауға қиын болғандықтан тиімсіз болып саналған. Уранның жерасты шаймалау ерітіндісінің құрамында табиғи кездесетін және тотығу процесін каталитикалық жылдамдататын темір (III) иондарын тотықтырғыш ретінде қолдану ерекше тиімді болып табылады.

Осы мақсатта жүргізілген зерттеулерде шаймалаушы ерітінді құрамына натрий нитритын енгізу темір (II) иондарының жылдам тотығуына әсер ететінін көрсетілген [5,6]. Дегенмен, зерттеулер нәтижесі натрий нитритін тотықтырғыш ретінде қолданудың біраз кемшіліктерін де көрсетті. $NaNO_2$ қолданғанда, тіпті күкірт қышқылының концентрациясын арттырғанның өзінде өндіру дәрежесінің артуына әсер етпеді, оның орнына ерітіндінің труба арқылы сүзілу жылдамдығы төмендеді. Соңғысы былай түсіндірілуі мүмкін: ерітіндінің қышқылдығы артқан кезде элементті күкірттің түзілуі мүмкін, ал ол, өз кезегінде, ерітіндінің сүзілуіне кедергі жасайды, сәйкесінше уранды шаймалау дәрежесі төмендейді.

АҚШ-та уран өндірісінде тотықтырғыш ретінде толығымен дерлік сутек пероксиді қолданылады. Тотықтырғыш ретінде H_2O_2 қолданудың өз артықшылықтары бар: суда жақсы еритін болғандықтан, оны жоғары концентрацияларда қолдануға болады. Сонымен қатар, тотықсыздандырғышпен әрекеттесу нәтижесінде экологиялық таза өнім - су түзіледі және реакция кезінде қышқылдың аз мөлшері жұмсалады. Дегенмен, күкірт қышқылы ерітіндісіне сутек пероксидін қосу ерітіндінің коррозиялық қасиеттерін жоғарылатып, қарапайым болат маркаларының коррозиясына алып келеді. Елімізде бұл реагенттің өндірілмейтінін ескеретін болсақ, оны уран өндірісінде қолдану шетелден тасымалдау құнымен қоса қымбаттай түсуімен рационалды емес шешім болар еді деп тұжырым жасалған [7].

Жер қойнауындағы уранды тотықтыру үшін сол кен құрамындағы темірдің қосылыстарын қолдану ең қарапайым, тиімді және арзан әдіс болып табылады. Жерасты шаймалау кезінде темір қосылыстары уранмен бірге ериді және әрбір ерітінді айналымы сайын оның мөлшері артады. Ерітіндідегі Fe (III) иондарының концентрациясы шамамен 1.2-2 г/л құрайды. Уранды тотықтыру үшін темір (III) иондарын қосымша ерітіндіге қосу экономикалық тұрғыдан тиімсіз. Сондықтан ерітіндідегі Fe (II) иондарын тотықтыру арқылы Fe (III) иондарын регенерациялауға арналған ұтымды технологиялар жасау қажет. Мысалы, Тәжікстанда уранды жерасты шаймалау процесін қолданатын кен орындарында темір (II) иондарын сулы-органикалық жүйелерді қолдану арқылы тотықтырудың жаңа гетерогенді автокаталитикалық әдісі іске асырылған [8-11].

Уранды өндірудің гидрометаллургиялық процестерінде темір иондарын қолдану маңыздылығын ескере отырып, бұл жұмыста шаймалаушы ерітінділер дайындау сатысында күкірт қышқылды ерітінділерде темір (II) иондарын үш валентті күйге дейін анодты тотықтыру арқылы Fe^{3+} иондарын регенерациялаудың электрохимиялық әдісі қарастырылды.

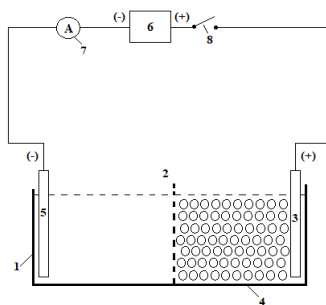
2. Зерттеу әдістері

Темір иондарының тотығу тотықсыздану механизмі «CorrTest Electrochemical Workstation» потенциостат-гальваностатында (сурет 1) потенциодинамикалық режимде анод-катодты циклді поляризациялық қисықтарын түсіру арқылы зерттелді. Поляризация қисықтары дербес компьютерде орнатылған CS Studio5 бағдарламасы арқылы жазылды. Негізгі поляризация қисықтары 50 мВ/с потенциал беру жылдамдығында тіркелді.



Сурет 1 – «CorrTest Electrochemical Workstation» потенциостат-гальваностаты: 1-потенциостат; 2-дербес ноутбук; 3- электрохимиялық ұяшық; 4-жұмысшы электрод; 5-салыстырмалы электрод (күмісхлор); 6-көмекші электрод (платина).

Алдын ала жүргізілген күкірт қышқылды ерітінділерде екі валентті темір иондарын электрохимиялық тотықтыруға бағытталған зерттеу нәтижелері кеңістігі диафрагмамен бөлінбеген электролизерде темір (II) иондарының эффективті тотығуы жүрмейтінін көрсетті. Себебі, анодта түзілген темір (III) иондары катодта қайтадан тотықсызданып, қайтымды процесс орын алады. Сондықтан, процесс өнімділігін арттыру үшін зерттеулер арнайы конструкциялы, кеңістіктері диафрагмамен бөлінген электролизерде беттік ауданы дамытылған графит немесе қорғасыннан жасалған түйіршікті электродтарды қолдану арқылы жүргізілді. Электролизердің принципалды схемасы 2-суретте көрсетілген. Бұл әдістің жұмыс істеу принципі келесідей: анионитті мембранамен (2) бөлінген электролизердің (1) анодты кеңістігіне пластиналы графит электродын (3) салып, оған ауданы дамытылған графит түйіршікті электродтар (4) орналастырады. Катод (5) ретінде графит немесе титан электроды қолданылды. Анодтық кеңістік құрамында темір (II) иондары бар күкірт қышқылды ерітінді, ал катод кеңістігі күкірт қышқылы ерітіндісімен толтырылады.

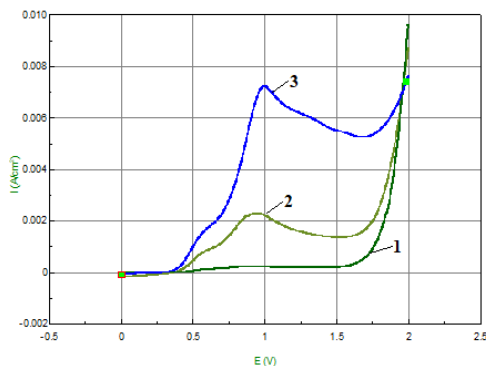


Сурет 2 - Екі валентті темір иондарын үш валентті күйге дейін тотықтыруға арналған қондырғының принципалды схемасы: 1-электродтық кеңістіктері бөлінген электролизер, 2-диафрагма- МА-40 анионитті мембрана, 3-пластиналы графит электроды, 4- түйіршікті графит электродтар, 5-титан катоды, 6-В-24 ток көзі, 7-амперметр, 8-кілт.

3. Зерттеу нәтижелері мен талқылануы

Темір (II)-темір (III) тотығу-тотықсыздану жүйесіндегі реакциялардың жүру механизмін түсіну мақсатында күкірт қышқылы ерітіндісінде платина электродының катодты және анодты-катодты, катодты-анодты циклді поляризациялық қисықтары түсірілді.

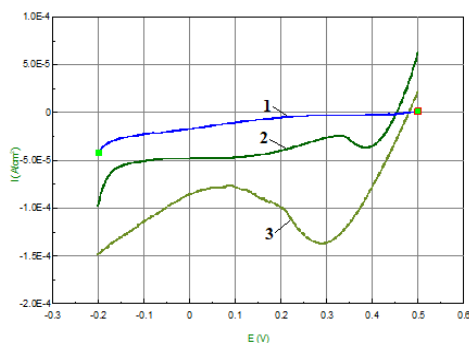
Анодты потенциодинамикалық поляризациялық қисықта «плюс» 0.4-0.5 В потенциалдарынан бастап екі валентті темір иондарының тотығуы, ал 1.75 В потенциалдар аумағында оттегі газының бөліну токтары тіркелді (сурет 3).



Сурет 3 - Платина электродының анодты потенциодинамикалық поляризациялық қисықтары: 1) $C[Fe^{2+}]$ -0.1 г/л, 2) $C[Fe^{2+}]$ -1 г/л, 3) $C[Fe^{2+}]$ -5 г/л, сканерлеу жылдамдығы 50 мВ/с.

Тотығу тогының максимумдарының мәні темір (II) иондарының концентрацияларының артуына байланысты өседі.

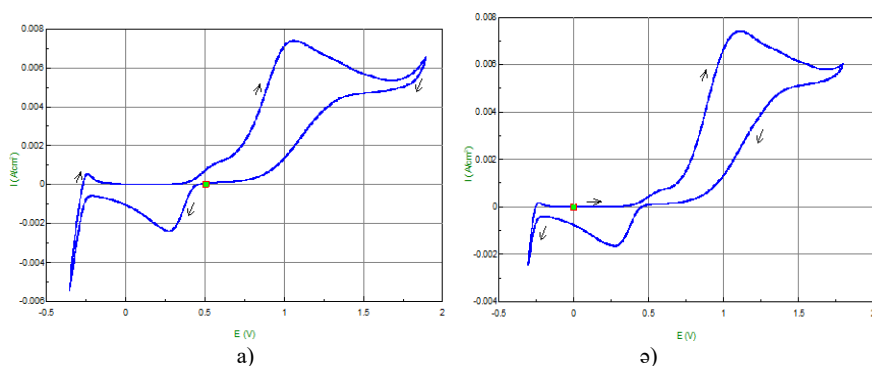
4-суретте платина электродында түсірілген үш валентті темір иондарының катодты поляризациялық қисықтары келтірілген.



Сурет 4 - Платина электродының катодты потенциодинамикалық поляризациялық қисықтары: 1) $C[Fe^{3+}]$ -0.1 г/л, 2) $C[Fe^{3+}]$ -1 г/л, 3) $C[Fe^{3+}]$ -5 г/л, сканерлеу жылдамдығы 50 мВ/с.

«Плюс» 0.5 потенциал мәнінен бастап темір (III) иондарының тотықсыздану токтарының иаксимумдары E-J қисығында тіркелді. «Плюс» 0.15 В потенциалдар аймағында сутек газының бөліну тогы байқалады. Темір (III) иондарының тотықсыздану максимумдарының биіктігі иондардың концентрациясына байланысты өседі.

Платина электродтарында түсірілген катодты-анодты және анодты-катодты циклді поляризациялық қисықтар темір иондарының тотығу-тотықсыздану реакцияларының қайтымды екенін және бұл реакциялардың көп емес аса кернеулікпен жүретіндігін көрсетіп отыр (сурет 5а, 5ә).



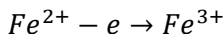
Сурет 5 - Платина электродының а) катодты-анодты және б) анодты-катодты потенциалдинамикалық поляризациялық қисықтары: $C[Fe^{3+}]$ -5 г/л, сканерлеу жылдамдығы 50 мВ/с.

Демек, бұл иондарды катодты және анодты поляризациялау арқылы әртүрлі валентті жағдайға оңай өткізуге болатындығын көрсетеді.

Келесі зерттеулерімізде екі валентті темір иондарының тотығуын гальваностатикалық жағдайда электролиз жүргізу арқылы іске асырылды.

Fe^{3+} иондарын электрохимиялық регенерациялау процесі жүруінің негізгі параметрлерін анықтау бойынша моделді ерітінділерді қолдана отырып лабораториялық зерттеулер жүргізілді.

Электролиз кезінде графит немесе қорғасын анодында темір (II) иондары үшвалентті күйге дейін тотығады:



Алғашқы эксперименттер жалпы көлемі 1 л болатын электролизерде стационарлы жағдайда 30 мин бойы жүргізілді. Анодты кеңістікке құрамында 20 г/л күкірт қышқылы мен 3 г/л екі валентті темір иондары бар моделді ерітінді құйылды. 1-кестеде пластиналы графит анодындағы ток тығыздығының темір (II) иондарының үш валентті күйге дейін тотығу процесінің ток бойынша шығымына әсерін көрсететін мәліметтер келтірілген.

Кесте 1 - Пластиналы графит анодындағы ток тығыздығының темір (II) иондарының тотығу процесінің ток бойынша шығымына әсері: H_2SO_4 -20 г/л, Fe^{2+} -3 г/л, $\tau=30$ мин, $t=25^\circ C$

$i, A/m^2$	0	25	50	100	150	200	250
ТШ, %	0	98.1	81.3	69.7	49.8	33.9	29.4

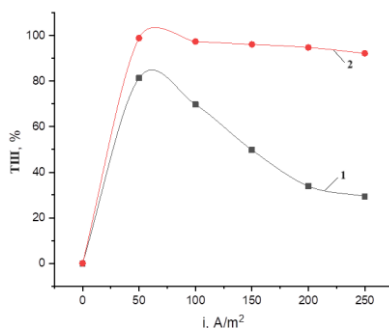
Эксперимент нәтижелерінен көрініп тұрғандай, темір (II) иондарының тотығуының ток бойынша шығымы тек ток тығыздығының мәні 25-50 A/m^2 болғанда ғана 80%-дан асады, ал одан жоғары ток тығыздықтарында бұл көрсеткіш төмен мәнге ие, 200 A/m^2 ток тығыздығында тіпті 40 %-дан да аспайды. Бұл тізбек арқылы өтетін токтың 40 %-ы ғана екі валентті темір

иондарын тотықтыруға жұмсалатынын көрсетеді. Темір (II) иондарының тотығуының ток бойынша шығымын арттыру мақсатында эксперименттерде алғаш рет ішіне орташа өлшемдері 5-10 мм болатын аудандары дамытылған түйіршіктелген графит электродтар орналастырылған пластиналы графит электрод қолданылды (кесте 2).

Кесте 2 - Түйіршікті электродтар қатысында пластиналы графит электродтағы анодты ток тығыздығының темір (II) иондарының тотығуының ток бойынша шығымына әсері: H_2SO_4 -20 г/л, Fe^{2+} -3 г/л, $\tau=30$ мин, $t=25^\circ C$

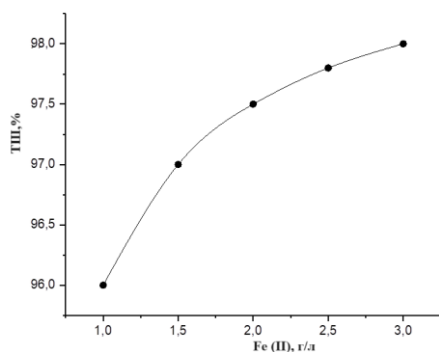
$i, A/m^2$	0	50	100	150	200	250
ТШ, %	0	98.9	97.4	96.1	94.8	92.2

Зерттеу нәтижелерінен ауданы дамытылған түйіршікті электродтарды қолданғанда тіпті $200 A/m^2$ -ден асқан ток тығыздықтарында темір (II) иондарының 90 %-дан асатын өте жоғары ток бойынша шығымымен тотығатынын байқауға болады. Демек пластиналы электродтағы тотығу процесімен салыстырғанда темір (II) иондарының тотығуының тиімділігі іс жүзінде екі еседен аса артады (сурет 7).



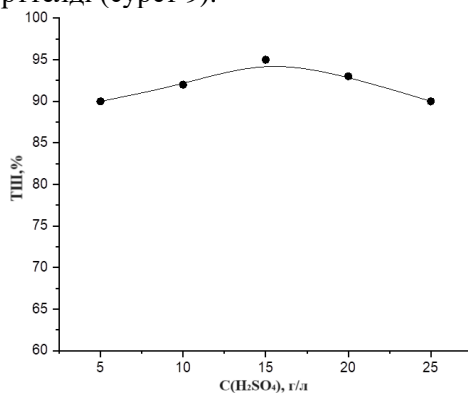
Сурет 7 - Темір (II) иондарының тотығуының ток бойынша шығымының ток тығыздығына тәуілділігі: 1- пластиналы графит электродында, 2- түйіршікті графит салынған электродта.

Темір (II) иондарының бастапқы концентрациясы бойынша оның түйіршікті графит электродтардағы тотығуының ток бойынша шығымы анықталды. Ерітіндідегі темір (II) иондарының концентрациясының 1-3 г/л аралығында артуымен осы иондардың анодты кеңістікте тотығуының ток бойынша шығымы 98 %-ға дейін артатыны байқалды (сурет 8). Бұл зерттеулердің нәтижелері екі валентті темір иондарының тотығуы жоғары ток тығыздықтарымен жүретінін көрсетеді.



Сурет 8 - Темір (II) иондары тотығуының ток бойынша шығымының темір (II) иондарының бастапқы концентрациясына тәуілділігі.

Күкірт қышқылының 5-25 г/л аралығындағы концентрациясының темір иондарының түйіршікті графит электродтарында тотығуының ток бойынша шығымына әсері зерттелді (сурет 9).



Сурет 9 - Темір (II) иондары тотығуының ток бойынша шығымының күкірт қышқылы концентрациясына тәуелділігі.

Концентрацияның өзгеруі ток бойынша шығым мәніне аздап ғана әсер етті, максималды ток бойынша шығым 95 % 15 г/л H_2SO_4 концентрацияда тіркелсе, басқа концентрацияларда оның мәні максималдыдан сәл ғана өзгеріп, 90-93 %-ды құрады.

4. Қорытынды

Уран кен орындарының минералдарын шаймалау әдісі арқылы уран иондарын ерітіндіге өткізу кезінде қолданылатын үш валентті темір иондарының электрохимиялық қасиеті потенциодинамикалық поляризациялық қисықтар түсіру және гальваностатикалық жағдайда электролиз жүргізу арқылы зерттелді. Зерттеу нәтижелері темір (II)-темір

(II) тотығу-тотықсыздану реакцияларының қайтымды екенін және бұл реакцияларды көп емес аса кернеулікпен жүретіндігін көрсетті.

Электродтық кеңістіктері анионитті мембранамен бөлінген, түйіршікті анод электродтарын қолдану арқылы екі валентті темір иондарының тотығуына негізгі электрохимиялық параметрлердің әсері алғаш рет зерттелді. Оптималды жағдайда екі валентті темір иондарының тотығуының ток бойынша шығымы 90 % жоғары болатындығын зерттеу нәтижелері көрсетті.

Жүргізілген жан-жақты зерттеу жұмыстары уран өндірісінде жерасты шаймалау процесінде кеңінен қолданылып жүрген үш валентті темір иондарын электрохимиялық әдістер арқылы іске асыруға болатындығын көрсетті.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар бұл мақалада өзара мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ СПОСОБ РЕГЕНЕРАЦИИ ТРЕХВАЛЕНТНОГО ЖЕЛЕЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

А. Баешов¹, А. К.Баешова², М.Н.Турлыбекова^{3}, Б.Э.Мырзабеков⁴*

¹*«Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан», Алматы, Казахстан*

²*Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

³*Казахский Национальный педагогический Университет имени Абая, Алматы, Казахстан*

⁴*Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского, Алматы, Казахстан*

*E-mail: m.t.89@mail.ru

Резюме. *Введение.* В связи с увеличением потребности в электроэнергии с развитием производства и общей инфраструктуры увеличение добычи урана как экономически и экологически эффективного источника энергии является актуальной проблемой. *Целью данной работы* является разработка электрохимического метода регенерации ионов железа (III), используемых в качестве окислителя урана в процессе подземного выщелачивания урановых минералов растворами серной кислоты. *Методы.* Механизм реакций в окислительно-восстановительной системе железо (II)-железо (III) изучен методом снятия потенциодинамических поляризационных кривых и электролиза в гальваностатических условиях. *Результаты и обсуждение.* Катодно-анодные и анодно-катодные циклические поляризационные кривые, снятые на платиновых электродах, показали, что окислительно-восстановительные реакции ионов железа обратимы и эти реакции протекают при незначительном перенапряжении. Влияние основных электрохимических параметров (плотность тока, концентрации ионов железа (II) и серной кислоты) на окисление ионов двухвалентного железа впервые исследовано с использованием гранулированных анодных электродов, электродные пространства которых разделены анионитовой мембраной. Установлено, что использование гранулированных графитовых электродов при окислении ионов двухвалентного железа увеличивает выход по току более чем в 2 раза по сравнению с пластинчатым графитовым электродом. *Заключение.* По результатам исследования замечено, что в оптимальных условиях выход по току окисления ионов двухвалентного железа превышает 90%. В результате всесторонних исследований было показано, что ионы трехвалентного железа, широко используемые в процессе подземного выщелачивания при производстве урана, можно регенерировать электрохимическими методами.

Ключевые слова: ионы железа (II), окисление, кусковой электрод, регенерация, подземное выщелачивание урана.

Баешов Абдуали	Доктор химических наук, профессор, академик НАН РК
Баешова Ажар Коспановна	Доктор технических наук, профессор
Турлыбекова Макпал Нышангалиевна	Докторант, научный сотрудник
Мырзабеков Бекзат	PhD, старший научный сотрудник

Әдебиеттер тізімі

1. Ергожин Е.Е., Мухитдинова Б.А., Шекеева Б.Ж. Подземное выщелачивание урана (обзор). *Хим. Жур. Каз.* **2008**, 2, 5-28.
2. Turganaliyev C. et al. Physico-chemical aspects of uranium extraction for investigation of underground well leaching control systems. *Compl. use of min. resour.* **2024**, 329(2), 5-16. DOI: <https://doi.org/10.31643/2024/6445.12>
3. Аликулов Ш. Ш., Ибрагимов Р. Р., Хамидов Р. А. Исследования интенсификации процесса скважинного подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд при воздействии на них различными физическими методами. *Mining Inform. and Anal. Bull.* **2023**, 2, 111-126. DOI: [10.25018/0236_1493_2023_2_0_111](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_2_0_111)
4. Носков М.Д. Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания. *Изв-во СТИ НИЯУ МИФИ*, **2010**, 83.
5. Пастухов А.М., Рычков В.Н. и др. Термодинамическое моделирование процесса скважинного подземного выщелачивания урана. *Изв. Выс. завед. Горн. Журн.* **2014**, 7, 120-126. ISSN: 0536-1028
6. Рычков В.Н., Пастухов А.М. Применение искусственных окислителей для интенсификации процесса подземного выщелачивания урана. *Отч. о науч.-исслед. раб. УРФУ.* **2013**, 21. <http://elar.urfu.ru/handle/10995/21454>
7. Дуйсебаев М.О., Мукушева А.С., Батыршаева Г.С., Полиновский К.Д. Перспективы применения пероксосерных кислот при ПСВ урана. *Горн. инфор.-анал. бюлл.* **2008**, 8, 312-314. [Перспективы применения пероксосерных кислот при ПСВ урана \(elibrary.ru\)](http://elibrary.ru)
8. Sharafutdinov U. Z. et al. Applying the Fe⁺³ oxidizer as an improvement in the efficiency of uranium extraction. *Turkish Jour. of Comp. and Math. Edu. (TURCOMAT)* **2021**, 12(7), 384-386. DOI: <https://doi.org/10.17762/TURCOMAT.V12I7.2592>
9. de Moraes M. L. B., Ladeira A. C. Q. The role of iron in the rare earth elements and uranium scavenging by Fe-Al-precipitates in acid mine drainage. *Chemosphere* **2021**, 277, 130-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130131>
10. Loregian L. et al. Role of iron sulfide phases in the stability of noncrystalline tetravalent uranium in sediments. *Environ. Sci. & tech.* **2020**, 54(8), 4840-4846. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07186>
11. Rakishev B. et al. Improving the efficiency of downhole uranium production using oxygen as an oxidizer. *Minerals* **2022**, 12(8), 1005. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12081005>

References

1. Ergozhin E.E., Muhitdinova B.A., Shekeeva B.Zh. Podzemnoye vyshelachivaniye urana (review). *Chem.J.Kaz.* **2008**, 2, 5-28. (In Russ)
2. Turganaliyev C. et al. Physico-chemical aspects of uranium extraction for investigation of underground well leaching control systems. *Compl. use of min. resour.* **2024**, 329(2), 5-16. DOI: <https://doi.org/10.31643/2024/6445.12>
3. Alikulov Sh. Sh., Ibragimov R. R., Hamidov R. A. Issledovaniya intensivatsii processa skvazhinogo podzemnogo vyshelachivaniya urana iz slabopronicaemyh rud pri vozdeystvii na nih razlichnymi fizicheskimi metodami. *Mining Inform. and Anal. Bull.* **2023**, 2, 111-126. (In Russ) DOI: [10.25018/0236_1493_2023_2_0_111](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_2_0_111)
4. Noskov M.D. Dobycha urana metodom skvazhinogo podzemnogo vyshelachivaniya. *Seversk: Publish. House of the Nat. Research Inst. of MEFPhI* **2010**, 83. (In Russ)
5. Pastuhov A.M., Ryckov V.N. i dr. Termodinomicheskoe modelirovaniye processa skvazhinogo podzemnogo vyshelachivaniya urana. *News of High.Edu.Institut. Mining.Jour.* **2014**, 7, 120-126. (In Russ) ISSN: 0536-1028

6. Rychkov V.N., Pastuhov A.M. Primenenie iskusstvennyh okislitelej dlya intensivatsii processa podzemnogo vyshelachivaniya urana. *URFU Research Report*. **2013**, 21. <http://elar.urfu.ru/handle/10995/21454>
7. Dujsebaev M.O., Mukusheva A.S., Batyrshaeva G.S., Polinovskij K.D. Perspektivy primeneniya peroksosemykh kislot pri PSV urana. *Mining.Infor.Anal.Bull.* **2008**, 8, 312-314. Perspektivy primeneniya peroksosemykh kislot pri PSV urana (elibrary.ru) (In Russ)
8. Sharafutdinov U. Z. et al. Applying the Fe^{+3} oxidizer as an improvement in the efficiency of uranium extraction. *Turkish Jour. of Comp. and Math. Edu. (TURCOMAT)* **2021**, 12(7), 384-386. DOI: <https://doi.org/10.17762/TURCOMAT.V12I7.2592>
9. de Moraes M. L. B., Ladeira A. C. Q. The role of iron in the rare earth elements and uranium scavenging by Fe–Al-precipitates in acid mine drainage. *Chemosphere* **2021**, 277, 130-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130131>
10. Loreggian L. et al. Role of iron sulfide phases in the stability of noncrystalline tetravalent uranium in sediments. *Environ. Sci. & tech.*, **2020**, 54(8), 4840-4846. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07186>
11. Rakishev B. et al. Improving the efficiency of downhole uranium production using oxygen as an oxidizer. *Minerals* **2022**, 12(8), 1005. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12081005>