

FTAXP: 31.17.15

А.К. Баешова¹, Ұ.Ә. Ораз^{1*}, А. Баешов²¹Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті,

050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., әл-Фараби даңғылы, 71

²Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты,

050000, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Қонаев к., 132

*e-mail: alhanovna.u@gmail.com

**КҮКІРТҚЫШҚЫЛДЫ ОРТАДА Fe(II) – Fe(III) «RED-OX» ЖҮЙЕСІН ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ
ХИМИЯЛЫҚ ТОК КӨЗІНІҢ ҚАЛЫПТАСУЫН ЗЕРТТЕУ**

Аңдатпа: Энергия сақтау технологияларының арасында ағынды аккумуляторлар ерекше көңіл бөлуге лайық болып табылады. Олардың жұмыс принциптері ауыспалы валентті иондарды қолдануға негізделген. Қышқыл ерітінділерде Fe(II)/Fe(III) «red – ox» жүйесін қолдану арқылы химиялық ток көзін жасау және түзілген электр қозғаушы күш (ЭҚК) пен қысқа тұйықталған токтың (ҚТТ) мәнін иондардың концентрациясына байланысты анықтау. Эксперименттер графит электродтарының арасында түзілген ЭҚК және ҚТТ мәндерін өлшеу әдісімен жүргізілді. Қондырғы электродтық кеңістіктері бөлінген электролизерден, амперметр, вольтметр және графит электродтарынан құралған. Электролит ретінде қышқылданған темір (II) және темір (III) сульфаттары қолданылған. Электродтық кеңістіктері анионитті мембранамен бөлінген электролизерде кеңістіктің бірін темір (II) сульфаты, ал екіншісін – темір (III) сульфаты ерітіндісімен толтырған кезде, графит электродтарының арасында ЭҚК пайда болады. Графит электродтарын сыммен жалғағанда, бірінші электродтық кеңістікте темір (II) тотығады, ал екінші кеңістікте темір (III) тотықсызданады. Химиялық ток көзі құрылады. Темір (II) концентрациясын 1-40 г/л аралығында өзгерткенде, темір (III) концентрациясы 20 г/л болғанда потенциал теріс мәндер жаққа ығысады. Темір (III) концентрациясы 1 г/л болғанда потенциал 509 мВ құраса, 40 г/л-де – 475 мВ. Темір (II) тұрақты болған кезде Fe(III) қосу – потенциал мәнін оңға жылжытуға әкеледі. Осылардың нәтижесінде ЭҚК және ҚТТ мәндерінің артуы байқалады.

Түйін сөздер: темір (II) – темір (III) иондары, электр қозғаушы күш, қысқа тұйықталған ток, электролит, графит, электрод.

Кіріспе

Қазба көмірсутек отындарының жетіспеушілігі мен қоршаған ортаның ластануының күшеюіне байланысты жел мен күн энергиясы сияқты жаңартылатын энергия көздеріне кең назар аударылуда [1]. Қазіргі уақытта әлемдік қажеттіліктерге байланысты, әсіресе дамыған және дамушы елдерде электр энергиясын өндірудің қазба отындары сияқты дәстүрлі көздерін жаңа баламалы көздерге ауыстыру қажеттіліктері туындауда. Осыған орай әртүрлі энергетикалық технологияларды жасап шығару, дамыту қажет [2]. Осы мақсатта бірқатар аккумуляторлар жасау, оларды құрастырғанда басқа жаңа элементтерді немесе қосылыстарды пайдалану – жинақталған химиялық энергияны жоғары тиімділікпен және қоршаған ортаға зиянды газдарды шығармастан, электр энергиясына айналдыруға қол жеткізуге мүмкіндік беретіні анық [3]. Энергияны тиімді сақтау – қайта қалпына келетін энергия көздеріне көшудің кілті болып табылады [4]. Алайда, жаңартылатын ток көздерінің тұрақсыздығы мен күрделілігіне байланысты электр жүйесінде энергияны біркелкі және қауіпсіз түрде өткізу әртүрлі қиындықтар тудырады [5]. Сол себептен, бұл мәселені шешу үшін энергияны сақтаудың арзан, қарапайым, жаңа технологияларын жасау қажет. Әртүрлі энергия жинақтаушы технологиялардың арасында ағынды аккумуляторлардың жұмыс істеу принциптері кеңінен зерттелуде. Өйткені, ағынды ток көздерінің ерекшеліктері – электр сыйымдылығымен қатар оның электр қуаттылығының қауіпсіздік деңгейінің жоғары болуы. Сонымен қатар, аккумуляторлардың ток өткізгіштігіне қойылатын негізгі талаптарының бірі – электрохимиялық тұрақтылық. Аккумуляторды зарядтау және разрядтау кезінде, ток

қабылдағыштар тотығу-тотықсыздану ортасына электрохимиялық төзімді болуы керек [6]. Көптеген зерттеушілер ағынды батареялар үшін жаңа тотығу-тотықсыздану жүйесі мен органикалық және бейорганикалық жүйелерді зерттеуді қолға алған [7]. Бірқатар ғылыми еңбектерде – хинон [8], виологен [9] және феназин туындылары сияқты органикалық қосылыстар тотығу-тотықсыздану жүйесінде өткізу жылдамдығы жоғары электролит ретінде қолданылған. Құрамында хинон бар сулы электролиттерге негізделген ағынды тотығу-тотықсыздану батареялары, жүйелі түрде қайта өңделетін энергия сақтау көзіне айналған [10]. Дегенмен, су-органикалық ағынды батареялар кейбір күрделі мәселелерге тап болуда. Мысалы, олардың негізгілері – органикалық қосылыстардың тұрақтылығының төмен болуы. Ал, керісінше, бейорганикалық ағынды батареялар өзінің жоғары тұрақтылығы мен иондарының жоғары ерігіштігіне байланысты көзге түсуде. Көптеген бейорганикалық ағынды аккумуляторлардың арасында темір-хром, мырыш-темір, темір-марганец аккумуляторлары белгілі [11]. Тағы бір мақаланың [12] авторлары ағынды аккумуляторда қолданылатын электродтардың түріне, табиғатына назар аударған. Мәселен, олардың зерттеулері бойынша электродтарға қойылатын негізгі талаптар мыналар: электрохимиялық белсенділігі, электр өткізгіштігі, қолжетімділігі, қолданылатын заттардың коррозиялық тұрақтылығы. Графит электродтарының осы талаптарға сай келетіні көрсетілген.

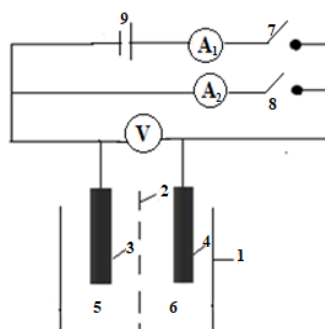
Ағынды аккумуляторларға арналған ғылыми мақалаларда әртүрлі «red – ox» жүйелер қолданылған, олардың өзіндік ерекшеліктері және артықшылықтары мен кемшіліктері бар.

Біздің жұмысымыздың мақсаты: күкіртқышқылды ерітінділерде тотығу-тотықсыздану $\text{Fe(II)} - \text{Fe(III)}$ «red – ox» жүйесін қолдану арқылы химиялық ток көзін жасау және осы кезде электр қозғаушы күш пен қысқа тұйықталған токтың түзілу заңдылықтарын анықтау.

Зерттеу әдістері

Зерттеулерді жүргізу үшін арнайы қондырғы жиналды, оның принципіалды схемасы 1 суретте көрсетілген. Қондырғы электролиттік кеңістіктері анионитті мембранамен (МА) бөлінген электролизерден, мультиметр (UT171A), графит электродынан (99,9 %) құралады. Электролит ретінде темір (II) және темір (III) сульфаттарының ерітінділері пайдаланылды.

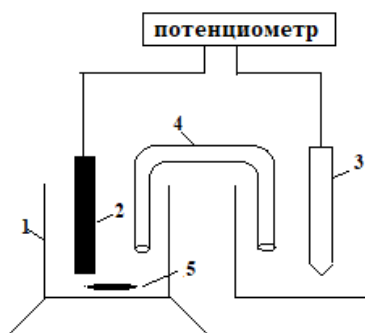
Көрсетілген қондырғыда (1-сурет) электр қозғаушы күшпен (ЭҚК) қысқа тұйықталған токтың (ҚТТ) мәндерін өлшеу былай іске асырылады: 7 және 8 кілтті ажырату арқылы екі электрод арасында орналастырылған вольтметрмен (V) ЭҚК өлшеуге болады. Ал 7-кілтті ажыратып, 8-кілтті қосқанда, екі электрод аралығындағы ҚТТ өлшенеді. 8 – кілтті ажыратып, 7-кілтті қосқанда, ток көзін (9) қолданып, электродтық кеңістіктердің екеуінде орналастырылған графит электродтары арқылы электролизердегі темір иондарын тотықтыруға немесе тотықсыздандыруға болады.



1 – электролизер, 2 – анионитті мембрана, 3,4 – графит электродтары, 5 – темір (II) сульфатының ерітіндісі, 6 – темір (III) сульфатының ерітіндісі, 7, 8 – тізбекті қосатын немесе ажырататын кілттер, 9 – ток көзі

Сурет 1 – Темір (II) – темір (III) гальваникалық элементте электр қозғаушы күш және қысқа тұйықталған ток мөлшерін өлшеуге арналған қондырғының принципіалды схемасы

Әр электродтық кеңістіктегі үш және екі валентті темір иондарының концентрацияларының ара – қатынасының графит электродында орнығатын тотығу – тотықсыздану потенциалға әсерін зерттелді. Бұл зерттеулер 2-суретте көрсетілген қондырғыда іске асырылды.



1 – құрамында Fe(II) – Fe(III) иондары бар ерітінді құйылған стакан; 2 – графит электроды; 3 – хлор-күмісті салыстырмалы электрод; 4 – көпіршік; 5 – магнитті араластырғыш

Сурет 2 – Fe(II) – Fe(III) иондары бар ерітіндіде графит электродында орныққан «red-ox» потенциалды өлшеуге арналған қондырғының принципиалды схемасы

Зерттеу нәтижелері

Әдебиеттен қайтымды реакция үшін тотығу-тотықсыздану электродтарының потенциалдары ($E_{ox/red}$) Нернст теңдеуімен анықталатыны белгілі:

$$E_{ox/red} = E^0_{ox/red} + (RT/nF) \ln(a_{ox}/a_{red}) \quad (1)$$

мұнда: $E^0_{ox/red}$ – иондардың стандартты тотығу-тотықсыздану потенциалдары;

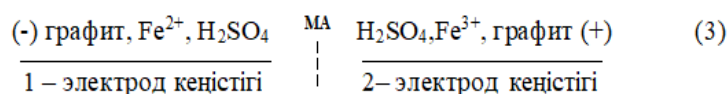
a_{ox}/a_{red} – тотыққан және тотықсызданған иондардың ерітіндідегі активтілігі;

Мысалы, $Fe^{3+} + e \rightarrow Fe^{2+}$ «red-ox» жүйесінің потенциалы 2-теңдеумен анықталады.

$$E^0_{Fe^{3+}/Fe^{2+}} = E^0_{Fe^{3+}/Fe^{2+}} + (RT/nF) \ln \frac{a_{Fe^{3+}}}{a_{Fe^{2+}}} \quad (2)$$

Қалыптасқан белгілі бір жағдайда индикаторлы графит электродында $Fe^{3+} - Fe^{2+}$ жүйесінде Нернст теңдеуіне сәйкес белгілі бір потенциал орнығады. Стандартты жағдайда оның мәні + 0.77 В тең.

Электролизердің графит электродтары орналасқан екі кеңістігін анионитті мембранамен бөлген кезде бір кеңістігі екі валентті темір иондары, ал екінші кеңістігі үш валентті темір иондары бар ерітінділермен толтырғанда, графит электродтарының арасында электр қозғаушы күш (ЭҚК) пайда болады. Стандартты жағдайда, теориялық тұрғыда бұл ЭҚК мәні + 0.77 В-қа тең. Бұл кезде 3-схемада көрсетілген гальваникалық тізбек түзіледі:



Бірінші және екінші электрод кеңістіктеріндегі графит электродтарын бір-бірімен мыс сымы арқылы жалғастырғанда, бірінші электрод кеңістігінде темір (II) иондарының тотығу реакциясы жүреді (4-реакция).



ал, екінші электрод кеңістігінде үш валентті темір иондарының тотықсыздану реакциясы орын алады (5 реакция).



Демек, электролизердің бір кеңістігінде тотығу, ал екінші кеңістігінде тотықсыздану реакциялары орын алады. Бірінші кеңістіктегі графит электродында 4-реакция нәтижесінде бөлінген электрон екінші кеңістіктегі графит электродына мыс сымы (5) арқылы жетіп, тотықсыздану реакциясы іске асады. Нәтижесінде концентрациялық поляризация негізінде

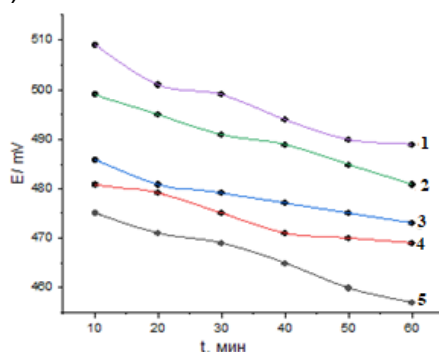
химиялық ток көзі түзіледі. Демек, гальваникалық жұпта (3) екі және үш валентті темір иондарының концентрацияларының мәніне байланысты химиялық ток көзі белгілі мөлшерде электр қозғаушы күшке ие болады. Бұл кезде сульфат иондары анионитті мембрана (МА) арқылы бір электрод кеңістігінен екіншісіне өтіп отырады.

Сонымен, $\text{Fe(II)} - \text{Fe(III)}$ жүйеде түзілген гальваникалық элемент химиялық ток көзі қызметін атқара алады.

Ғылыми нәтижелерді талқылау

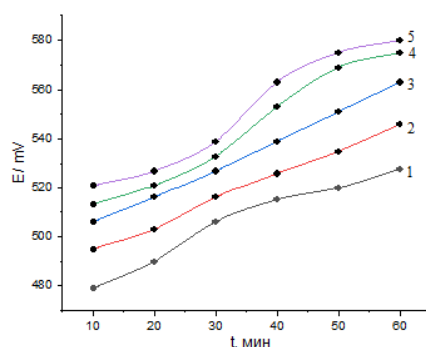
Графит электродындағы «red-ox» потенциалға құрамында 20 г/л үш валентті темір иондары бар ерітіндіге екі валентті темір иондарының концентрациясының әсері зерттелді. Зерттеу нәтижелері Нернст теңдеуіне сәйкес ерітінділердегі екі валентті темір иондарының концентрациясы өскен сайын, графит электродының потенциалының мәні теріс жаққа қарай ығысатынын көрсетеді (3 сурет). Мысалы, темір (II) иондарының концентрациясы 1 г/л болғанда, электрод потенциалының мәні 509 мВ болады, ал 40 г/л болғанда 475 мВ-қа тең.

Құрамында 20 г/л екі валентті темір иондары бар ерітіндіге үш валентті темір иондарын қосқанда, Нернст теңдеуіне сәйкес графит электродының «red-ox» потенциалының мәні оң жаққа қарай ығысады (4 сурет).



$\text{Fe(III)} = 20 \text{ г/л}, t = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Сурет 3 – Темір (II) иондарының концентрациясының графит электродының потенциалына әсері: Fe (II), г/л: 1 – 1; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 20; 5 – 40



$\text{Fe(II)} = 20 \text{ г/л}, t = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

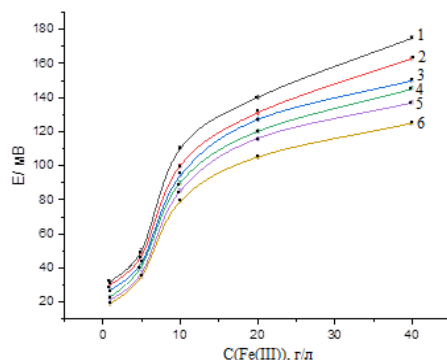
Сурет 4 – Темір (III) иондары концентрациясының графит электродының потенциалына әсері, Fe (III), г/л: 1 – 1; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 20; 5 – 40

Электролизердің екі кеңістігі де темір (II) және темір (III) иондарының сульфатты ерітіндісі бар электролиттермен толтырылды. Екі электрод кеңістігіндегі графит электродтарының арасында орныққан ЭҚК мен ҚТТ мәндерін өлшеу әрбір 10 минут сайын 1-суретте келтірілген қондырғыда іске асырылды.

Электролизердің бір кеңістігіне темір (II) немесе темір (III) иондарының концентрациясын 20 г/л тұрақты етіп, екінші кеңістігіндегі темір иондарының концентрациялары өзгертіліп отырып, олардың $\text{Fe(II)} - \text{Fe(III)}$ гальваникалық элементінде түзілген ЭҚК және ҚТТ мәндеріне әсері зерттелді.

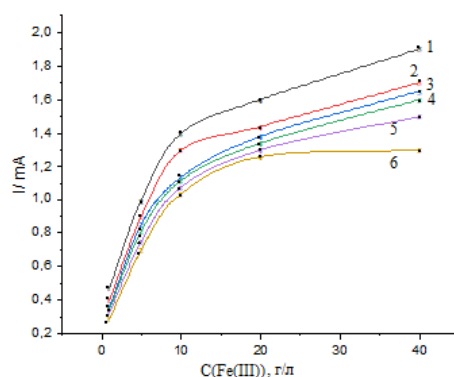
Алынған зерттеу нәтижелері өлшенген ЭҚК және ҚТТ мәндері электролизердің екінші электрод кеңістігіндегі иондардың концентрацияларына байланысты өзгертінін көрсетті. Бір электрод кеңістігінде темірдің екі валентті иондарының концентрациясы тұрақты болып (20 г/л), ал екінші электрод кеңістігіндегі темір (III) иондарының концентрациясы артқан сайын,

электр қозғаушы күштің арта түсетіндігі, ал уақыт өткен сайын төмендейтінін көрсетті. 5- және 6-суретке назар аударсақ, үш валентті темір иондарының концентрациясы артқан сайын гальваникалық элементте ЭҚК және ҚТТ мәндері өседі. Fe(III) иондарының концентрациясы 10 г/л болғанда 10 минутта ЭҚК мәні 172 mV болса, 60 минуттан кейін 128 mV, ҚТТ мәні, сәйкесінше, 1.85 mA және 1.3 mA мәнге ие болады.



Fe(II) = 20 г/л, H₂SO₄ – 1,0 г/л, t = 25 °C

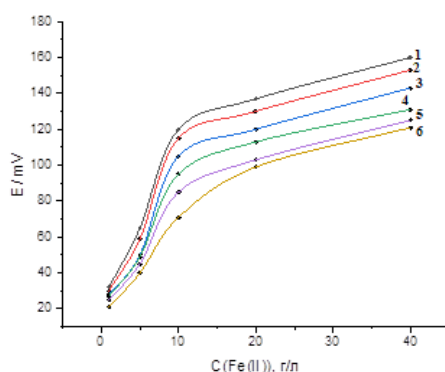
Сурет 5 – Fe(II) – Fe(III) гальваникалық жүйесіндегі электр қозғаушы күштің уақыт бойынша өзгеруі және оның мәніне Fe(III) иондарының концентрациясының әсері t, мин 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 5 – 50; 6 – 60



Fe(II) = 20 г/л, H₂SO₄ – 1,0 г/л, t = 25 °C

Сурет 6 – Fe(II) – Fe(III) гальваникалық жүйесіндегі қысқа тұйықталған токтың уақыт бойынша өзгеруі және оның мәніне Fe(III) иондарының концентрациясының әсері t, мин: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 5 – 50; 6 – 60

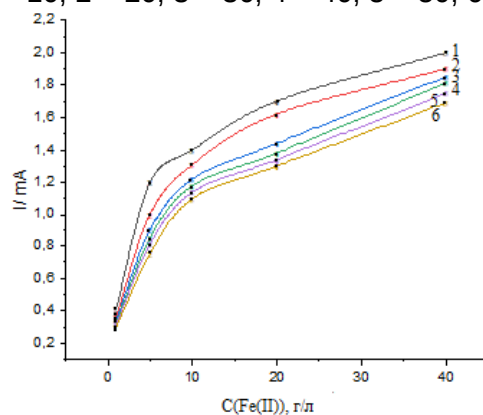
Бұл зерттеулерімізде Fe(II) – Fe(III) гальваникалық элементтің бір кеңістігінде үш валентті темір иондарының концентрациясын тұрақты етіп (20 г/л), екінші кеңістігіндегі екі валентті иондардың концентрациясын өзгертіп, оның гальваникалық элементте қалыптастырылатын ЭҚК және ҚТТ мәндеріне әсері зерттелді (7, 8 сурет).



Fe(III) = 20 г/л, H₂SO₄ – 1,0 г/л, t = 25 °C

Сурет 7 – Fe(II) – Fe(III) гальваникалық жүйесіндегі электр қозғаушы күштің уақыт бойынша өзгеруі және оның мәніне Fe(II) иондарының концентрациясының әсері t, мин:

1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 5 – 50; 6 – 60



$\text{Fe(III)} = 20 \text{ г/л}$, $\text{H}_2\text{SO}_4 = 1,0 \text{ г/л}$, $t = 25^\circ\text{C}$

Сурет 8 – $\text{Fe(II)} - \text{Fe(III)}$ гальваникалық жүйесіндегі қысқа тұйықталған токтың уақыт бойынша өзгеруі және оның мәніне Fe(II) иондарының концентрациясының әсері t , мин: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 5 – 50; 6 – 60

Электрод кеңістігінде екі валентті темір иондарының концентрациясының өсуі Нернст теңдеуі бойынша “red-ox” потенциалдың мәнін теріс жаққа қарай ығыстырады. Нәтижесінде $\text{Fe(II)} - \text{Fe(III)}$ гальваникалық жұбының ЭҚК және ҚТТ мәндері өзгеріске ұшырайды, демек өседі.

Осы зерттелген «red-ox» жүйені ағынды ток көздерінде қолдануға болады, себебі қазіргі күні олар үшін әртүрлі тиімді жүйелер іздестірілуде. Табиғаты бірдей иондардың қолданылуы электролиттердің бір-бірімен кездейсоқ араласып кетуі, сол себептен химиялық ток көзінің жұмыс істеуіне көп нұқсан келтірілуі сияқты қауіпті проблемаларды түгел жояды. Зерттелген «red-ox» жүйеде аккумулятор өз қабілетін жоғалтпайды. Сол себепті, $\text{Fe(II)} - \text{Fe(III)}$ «red-ox» жұбын қолданған ағынды гальваникалық элементті ток алу үшін немесе ток жинақтағыш аккумулятор ретінде қолданудың болашағы зор.

Қорытынды

Қорыта айтқанда, алғаш рет темір (II) – темір (III) «red-ox» жүйесін және графит электродтарын қолдану арқылы, электрод кеңістіктері анионитті мембранамен бөлінген электролизерді пайдаланып, химиялық ток көзін жасауға болатындағы айқын көрсетілді. Электролизердің әрбір кеңістіктеріндегі әртүрлі валентті темір иондарының концентрацияларының өзгеруінің ЭҚК және ҚТТ мәндеріне әсері зерттелді. Оптималды жағдайда, $\text{Fe(II)} - \text{Fe(III)}$ «red-ox» жүйесі бар бір гальваникалық жұбының 160 мВ-тен аса электр қозғаушы күшке ие болатындығы анықталды. Бұл нәтижелерді күн және жел электростанцияларымен алынған токтарды өте көп мөлшерде жинақтауға қабілетті, сыйымдылығы өте жоғары ағынды ток көздерін (аккумулятор) жасауға қолдануға ұсынуға болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Абрамова Д.А., Дубцов Н.Д., Петрова С.Е. Автономные источники энергии // Химические источники тока. Лучшая исследовательская статья 2023 / Сборник статей, 2023, 7. <https://naukaip.ru/wp-content/uploads/2023/01/K-448.pdf#page=7>.
2. Ang T.Z. et al. A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions // Energy Strategy Reviews. – 2022. – Т. 43. – С. 100939. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X2200133X>.
3. Mossali E. et al. Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments // Journal of environmental management. – 2020. – Т. 264. – С. 110500. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720304345>.
4. Armand M. et al. Lithium-ion batteries – Current state of the art and anticipated developments // Journal of Power Sources. – 2020. – Т. 479. – С. 228708. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775320310120>.
5. Нижниковский Е. Перспективы использования химических источников тока для электропитания автономной радиоэлектронной аппаратуры // Современная электроника. – 2010. – № 2. – С. 12. <https://www.soel.ru/upload/clouds/1/iblock/522/52251ebb9d235ea922132b35e71d7de8/20100201.2.pdf>

6. Zhu P. et al. A review of current collectors for lithium-ion batteries // *Journal of Power Sources*. – 2021. – Т. 485. – С. 229321. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775320316098>.
7. Годяева М.В., Воронков Д.Е., Казаринов И.А. Проточные редокс-батареи на основе органических веществ для накопления электрической энергии. – 2020. https://scholar.google.com/scholar?start=20&q=%D1%85%D0%B8%D0%BD%D0%BE%D0%BD+&hl=ru&as_sdt=0,5&as_ylo=2019.
8. Петров М.М. и др. Проточные редокс-батареи: место в современной структуре электроэнергетики и сравнительные характеристики основных типов // *Успехи химии*. – 2021. – Т. 90. – № 6. – С. 677-702. <https://www.uspkhim.ru/RCR4987pdf>.
9. Годяева М.В. и др. Проточные батареи на основе органических редокс-систем для крупномасштабного хранения электрической энергии // *Электрохимическая энергетика*. – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 59-85. <https://cyberleninka.ru/article/n/protochnye-batarei-na-osnove-organicheskikh-redoks-sistem-dlya-krupnomasshtabnogo-hraneniya-elektricheskoy-energii>.
10. Goulet M.A. et al. Extending the lifetime of organic flow batteries via redox state management // *Journal of the American Chemical Society*. – 2019. – Т. 141, №. 20. – С. 8014-8019. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jacs.8b13295>.
11. Кравченко Е.В. Обзор современных технологий накопления энергии // *Компетентность*. – 2023. – № 1. – С. 33-38. <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sovremennyh-tehnologiy-nakopleniya-energii>.
12. Фиалков А.С. Углерод в химических источниках тока // *Электрохимия*. – 2000. – Т. 36, № 4. – С. 389-413. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44689612>.

References

1. Abramova D.A., Dubcov N.D., Petrova S.E. Avtonomnye istochniki jenerгии // *Himicheskie istochniki toka. Luchshaja issledovatel'skaja stat'ja 2023 / Sbornik statej, 2023, 7*. <https://naukaip.ru/wp-content/uploads/2023/01/K-448.pdf#page=7>.
2. Ang T.Z. et al. A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions // *Energy Strategy Reviews*. – 2022. – Т. 43. – С. 100939. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X2200133X>.
3. Mossali E. et al. Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments // *Journal of environmental management*. – 2020. – Т. 264. – С. 110500. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720304345>.
4. Armand M. et al. Lithium-ion batteries – Current state of the art and anticipated developments // *Journal of Power Sources*. – 2020. – Т. 479. – С. 228708. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775320310120>.
5. Nizhnikovskij E. Perspektivy ispol'zovanija himicheskikh istochnikov toka dlja jelektropitanija avtonomnoj radiojelektronnoj apparatury // *Sovremennaja jelektronika*. – 2010. – № 2. – С. 12. <https://www.soel.ru/upload/clouds/1/iblock/522/52251ebb9d235ea922132b35e71d7de8/201002012.pdf>.
6. Zhu P. et al. A review of current collectors for lithium-ion batteries // *Journal of Power Sources*. – 2021. – Т. 485. – С. 229321. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775320316098>.
7. Godjaeva M.V., Voronkov D.E., Kazarinov I.A. Protochnye redoks-batarei na osnove organicheskikh veshhestv dlja nakoplenija jelektricheskoy jenerгии. – 2020. https://scholar.google.com/scholar?start=20&q=%D1%85%D0%B8%D0%BD%D0%BE%D0%BD+&hl=ru&as_sdt=0,5&as_ylo=2019.
8. Petrov M.M. i dr. Protochnye redoks-batarei: mesto v sovremennoj strukture jelektrojenergetiki i sravnitel'nye harakteristiki osnovnyh tipov // *Uspehi himii*. – 2021. – Т. 90, № 6. – С. 677-702. <https://www.uspkhim.ru/RCR4987pdf>.
9. Godjaeva M.V. i dr. Protochnye batarei na osnove organicheskikh redoks-sistem dlja krupnomasshtabnogo hraneniya jelektricheskoy jenerгии // *Jelektrohimicheskaja jenergetika*. – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 59-85. <https://cyberleninka.ru/article/n/protochnye-batarei-na-osnove-organicheskikh-redoks-sistem-dlya-krupnomasshtabnogo-hraneniya-elektricheskoy-energii>.

10. Goulet M.A. et al. Extending the lifetime of organic flow batteries via redox state management // Journal of the American Chemical Society. – 2019. – Т. 141, №. 20. – С. 8014-8019. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jacs.8b13295>
11. Kravchenko E.V. Obzor sovremennyh tehnologij nakopleniya jenergii. Kompetentnost', 2023, № 1, 33-38. <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sovremennyh-tehnologiy-nakopleniya-energii>
12. Fialkov A.S. Uglерod v himicheskikh istochnikah toka. Jelektrohimija. – 2000. – Т. 36, № 4. – 389-413. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44689612>

А.К. Баешова¹, У.А. Ораз^{1*}, А. Баешов²

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71

²АО «Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского»,
050000, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Кунаева, 132

*e-mail: alhanovna.u@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ТОКА В «RED-OX» СИСТЕМЕ Fe(II) – Fe(III) В СЕРНОКИСЛОЙ СРЕДЕ

Среди технологии, предназначенных для сохранения энергии, особого внимания заслуживают проточные аккумуляторы. Принцип действия их основан на применении систем из переменновалентных ионов. Целью работы является создание химического источника тока на основе применения «red – ox» системы Fe(II)/Fe(III) и определение закономерностей формирования величин электродвижущей силы (ЭДС) и тока короткого замыкания (ТКЗ) в кислых растворах в зависимости от концентрации ионов. Эксперименты проводятся методом измерения ЭДС, формирующейся между графитовыми электродами и ТКЗ. Собрана специальная установка, состоящая из электролизера с разделенными электродными пространствами, амперметра, вольтметра и графитовых электродов. Электролитом служили подкисленные растворы сульфатов железа (II) и железа (III). В электролизере, электродные пространства которого разделены анионитовой мембраной, при заполнении одного пространства сульфатом железа (II), а другого – сульфатом железа (III) между графитовыми электродами возникает ЭДС. При создании контакта между графитовыми электродами в первом электродном пространстве протекает окисление железа (II), а во втором – восстановление железа (III). Формируется химический источник тока. При концентрации железа (III), равной 20 г/л, изменение концентрации железа (II) в пределах 1-40 г/л способствует смещению потенциала графитового электрода в область отрицательных значений. При концентрации Fe(III), равной 1 г/л, значение потенциала составляет 509 мВ, а при 40 г/л – 475 мВ. Установлено, что в результате указанных изменений наблюдается возрастание ЭДС и ТКЗ.

Ключевые слова: ионы железа (II) – железа (III), электродвижущая сила, ток короткого замыкания, электролит, графит, электрод.

A. Bayeshova¹, U. Oraz^{1*}, A. Bayeshov²

¹Al-Farabi Kazakh National University,
050040 Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Avenue

²«D.V.Sokolsky Institute of fuel, catalysis and electrochemistry» JSC,
050000 Republic of Kazakhstan, Almaty, 132 Konaev st.

*e-mail: alhanovna.u@gmail.com

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF FORMATION OF A CHEMICAL CURRENT SOURCE IN THE «RED-OX» Fe(II) – Fe(III) SYSTEM IN A SULFURIC ACID ENVIRONMENT

Among the technologies designed to save energy, flow-through batteries deserve special attention. Their principle of operation is based on the use of systems of variably valent ions. The aim of the work is to create a chemical current source based on the use of the "red – ox" Fe(II)/Fe(III) system and to determine the patterns of formation of electromotive force (EMF) and short-circuit current (SCC) in acidic solutions depending on the concentration of ions. The experiments are carried out by measuring

the EMF formed between graphite electrodes and SCC. A special installation has been assembled, consisting of an electrolyzer with separated electrode spaces, an ammeter, a voltmeter and graphite electrodes. Acidified solutions of iron (II) and iron (III) sulfates served as the electrolyte. In an electrolyzer, the electrode spaces of which are separated by an anionite membrane, when one space is filled with iron (II) sulfate and the other with iron (III) sulfate, an EMF occurs between graphite electrodes. When making contact between graphite electrodes, iron (II) oxidation occurs in the first electrode space, and iron (III) reduction occurs in the second. A chemical current source is being formed. At a concentration of iron (III) equal to 20 g/l, a change in the concentration of iron (II) in the range of 1-40 g / l contributes to a shift in the potential of the graphite electrode to negative values. At a concentration of Fe(III) equal to 1 g/l, the potential value is 509 mV, and at 40 g / l – 475 mV. At a constant concentration of iron (II), the addition of Fe(III) leads to a shift in the EMF value to the right. It was found that as a result of these changes, an increase in EMF and SCC is observed.

Key words: iron (II) – iron (III) ions, electromotive force, short-circuit current, electrolyte, graphite, electrode.

Авторлар туралы мәліметтер

Ажар Коспановна Баешова – техника ғылымдарының докторы, профессор, e-mail: azhar_b@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9076-8130>.

Ұлжан Әлханқызы Ораз* – докторант, e-mail: alhanovna.u@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0801-5261>.

Абдуали Баешов – химия ғылымдарының докторы, профессор, Қазақстан Республикасының ҰҒА академигі, e-mail: bayeshov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0745-039X>.

Сведение об авторах

Ажар Коспановна Баешова – доктор технических наук, профессор, e-mail: azhar_b@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9076-8130>.

Улжан Альхановна Ораз* – докторант, e-mail: alhanovna.u@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0801-5261>.

Абдуали Баешов – доктор химических наук, профессор, академик НАН Республики Казахстан, e-mail: bayeshov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0745-039X>.

Information about the authors

Azhar Bayeshova – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: azhar_b@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9076-8130>.

Ulzhan Oraz* – Master, PhD-student, e-mail: alhanovna.u@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0801-5261>.

Abduali Bayeshov – Doctor of Chemical Science, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic Kazakhstan, e-mail: bayeshov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0745-039X>.

Материал 07.12.2023 ж. баспаға түсті.