

CREATION OF A CHEMICAL CURRENT SOURCE USING REDOX REACTIONS IN THE "IODINE-IODIDE" SYSTEM

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

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²«National Center on Complex Processing of Mineral Raw Materials of the Republic of Kazakhstan», Almaty, Kazakhstan

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

Abstract. *Introduction.* Chemical current sources play an important role in energy supply systems that are closely related to everyday life. The ever-increasing dependence on electricity creates a huge demand for appropriate energy storage devices. *The purpose:* The aim of the work is to create a chemical current source based on the use of the "red – ox" iodine-iodide system and to determine the patterns of formation of electromotive force (EMF) and short-circuit current (short-circuit current) in water solutions depending on the concentration of ions. *Objects.* 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. Solutions of iodine and potassium iodide served as the electrolyte. *Results.* In an electrolyzer, the electrode spaces of which are separated by an anionite membrane, when one of the spaces is filled with a solution of iodine and the other with potassium iodide, an EMF is formed between the graphite electrodes. Under optimal conditions, the EMF and SCC values will be higher than 135 mV and 10 mA, respectively. *Conclusion.* The possibility of forming a chemical current source using the "red – ox" iodine-iodide system is shown. The patterns of EMF and SCC formation and their changes depending on ion concentrations are revealed. The results of the study show that "red – ox" systems of alternating valent elements can be used to create flowing chemical current sources with increased electrical capacity.

Keywords: iodine, iodide ions, electromotive force, short-circuit current, electrolyte, graphite, electrode.

Bayeshova Azhar

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

Oraz Ulzhan

Master, doctoral student, e-mail: alhanovna.u@gmail.com

Bayeshov Abduali

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

Citation: Bayeshova A., Oraz U., Bayeshov A. Creation of a chemical current source using redox reactions in the "iodine-iodide" system. *Chem. J. Kaz.*, 2024, 2(86), 15-24. (In Kaz.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2024-2.2710-1185.17>

«ЙОД-ЙОДИД» ЖҮЙЕСİNДЕГІ ТОТЫҒУ-ТОТЫҚСЫЗДАНУ РЕАКЦИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ХИМИЯЛЫҚ ТОК КӨЗІН ЖАСАУ

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

¹Әл – Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

²«Қазақстан Республикасының минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу жөніндегі ұлттық орталығы», Алматы, Қазақстан

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

Түйіндеме. *Кіріспе.* Химиялық ток көздері (ХТК) күнделікті өмірмен тығыз байланысты энергиямен жабдықтау жүйелерінде маңызды рөл атқарады. Электр энергиясына үнемі өсіп келе жатқан тәуелділік тиісті энергия сақтау құрылғыларына үлкен сұраныс тудыруда. *Жұмыс мақсаты:* Сулы ерітінділерде йод-йодид «red – ox» жүйесін қолдану арқылы ХТК жасау және осы кезде электр қозғаушы күш (ЭҚК) пен қысқа тұйықталған токтың (ҚТТ) түзілу заңдылықтарын анықтау. *Әдістер.* 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 йод және калий йодиді ерітінділері қолданылған. *Нәтижелер және талқылау.* Электродтық кеңістіктері анионитті мембранамен бөлінген электролизерде кеңістіктің бірін йод, ал екіншісін – калий йодиді ерітіндісімен толтырған кезде, графит электродтарының арасында ЭҚК пайда болады. Оптималды жағдайда ЭҚК және ҚТТ мәндері, сәйкесінше 135 мВ және 10 мА-ден жоғары болады. *Тұжырым.* Йод-йодид «red – ox» жүйесін қолданып, химиялық ток көзін жасау мүмкіндігі көрсетілді. ЭҚК және ҚТТ-тың түзілу және олардың иондардың концентрацияларына байланысты өзгеру заңдылықтары анықталды. Зерттеу нәтижелері ауыспалы валентті элементтердің «red-ox» жүйелерін ағынды химиялық ток көздерін жасауда қолдануға болатыны көрсетеді.

Кілт сөздер: йод, йодид иондары, электр қозғаушы күш, қысқа тұйықталған ток, электролит, графит, электрод.

<i>Баешова Ажар Коспановна</i>	<i>Техника ғылымдарының докторы, профессор</i>
<i>Ораз Ұлжан Әлханқызы</i>	<i>Магистр, докторант</i>
<i>Баешов Абдуали</i>	<i>Химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі</i>

1. Кіріспе

Химиялық ток көздерінде (ХТК), бір электродта тотығу реакциясы, ал екінші электродта тотықсыздану реакциялары жүреді, осылардың нәтижесінде сыртқы электр тізбегінде электр тогы пайда болады. Химиялық ток көздерінің артықшылығы сонда, олар автономды жағдайда электр тогын пайдалануға мүмкіншілік береді. Химиялық ток көзін жасау үшін потенциалдарының мәні әртүрлі болып келетін электродтар қолданылады. Осы екі электродтың потенциал мәндерінің айырмашылығы жоғары болған сайын, электр қозғаушы күштің (ЭҚК) мәні де жоғарылай түседі [1].

Бүгінгі күні химиялық ток көздерінің ең кең таралған түрі литий-ионды аккумулятор болып табылады, бірақ олардың да кемшіліктері жоқ емес. Олар: температуралық диапазонының кішілігі (төмен және жоғары температурада жұмыс істемейді), циклдік қызмет ету мерзімінің қысқалығы, бағасының жоғарылығы, уыттылығы және тек күрделі электролиттерде жұмыс істеуі болып табылады [2]. Ондаған жылдар бойы электролиттер мен

электродтардың жетілдірілуі арқылы электрохимиялық энергияны сақтау жолдары дамуда. Энергияны сақтау қабілеті және энергияны сақтау құрылғыларының қауіпсіздігі іс жүзінде электрод пен электролит арасындағы иондар мен электрондардың орналасуымен анықталады. Келесі авторлар [3] электролит ретінде иондық сұйықтықтарды пайдаланатын литий-ионды аккумуляторлар мен суперконденсаторлардың физика-химиялық және электрохимиялық қасиеттерін қарастырған. Қуатты және ұзақ қызмет ететін электрохимиялық ток көздеріне деген сұранысты қанағаттандыру үшін жан-жақты ғылыми жұмыстар жүргізілуде [4]. Кейінгі кездері электрсыйымдылығы жоғары ағынды химиялық ток көздерін жасау бағытында ғылыми жұмыстар жүргізіліп келеді [5]. Қазіргі таңда әртүрлі валентті күйде бола алатын - темір, ванадий, хром, мыс, бром иондарын және тағы басқа көп валентті иондар негізіндегі тотығу-тотықсыздану жұптарының және олардың қосылыстарының «red-ox» потенциалдары зерттелген [6]. Сонымен қатар ағынды red-ox батареяларында, тотығу-тотықсыздану компоненті ретінде ерігіштігі жоғары, құны төмен, жоғары электрохимиялық қайтымдылығы сияқты қасиеттерінің арқасында иод-иодид иондарын қолдану тиімді болатындығы көрсетілген [7,8] және белгілі химиялық ток көздерінің түрлері қарастырылып, соңғы онжылдықта жасалған энергияны сақтау құрылғылары ұсынылған [9]. Бірқатар ғылыми-зерттеу жұмыстарда йодтың және оның қосылыстарын электрохимиялық тұрғыдан қайтымды жүйелер ретінде қолдану мүмкіндіктері көрсетілген, мысалы, металл-йодид жүйелерін [10,11], сонымен қатар йод-йодат жүйесін де қолдану мүмкіндігі айқындалған [12]. Осыған байланысты йод-йодид жүйелерін химиялық ток көздері ретінде пайдалануға болатынын көрсететін зерттеулер жүргізу өзекті мәселе болып есептелінеді.

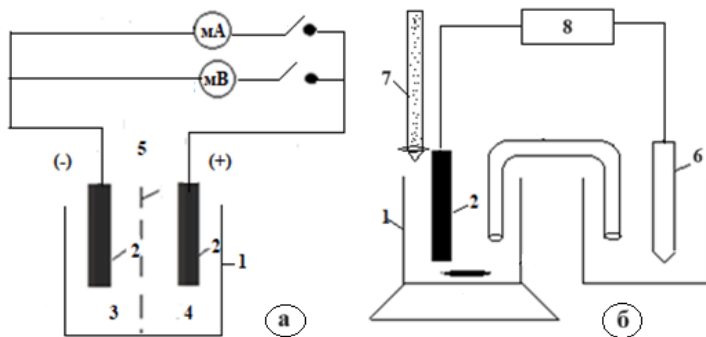
Біздің жұмысымыздың негізгі мақсаты: сулы ерітінділерде йод-йодид «red – ox» жүйесін қолдану арқылы химиялық ток көзін жасау және осы кезде электр қозғаушы күш пен қысқа тұйықталған токтың түзілу заңдылықтарын анықтау.

2. Зерттеу әдістері

Зерттеулер екі кеңістігі катионитті мембранамен (5) бөлінген электролизерде (1) жүргізілді. Электролизердің бір кеңістігі - калий йодиді (3), ал екінші кеңістігі (4) - йод бар электролитпен толтырылды. Инертті электродтар ретінде графит (2) электродтары қолданылды. Электролизердің принципіалды схемасы 1 – суретте көрсетілген.

Алғашқы зерттеулерімізде тотыққан және тотықсызданған иондардың концентрацияларының мөлшерінің инертті электродтардың потенциалдарына қалай әсер ететінін білу үшін, құрамында йод бар ерітіндіге йодид иондары бар ерітінді қосып және керісінше, йодид ерітінділеріне йод қосып, электрод потенциалдарының мәндері өлшенді. Алғашқы зерттеулерді көлемі 250 мл-ге тең химиялық стаканға концентрациясы 10 г/л, көлемі 20 мл калий йодидінің сулы ерітіндісін

құйып, оған бюретка (7) арқылы йод ерітіндісін біртіндеп қоса отырып, осы электролиттің тотығу-тотықсыздану потенциалы өлшенді.



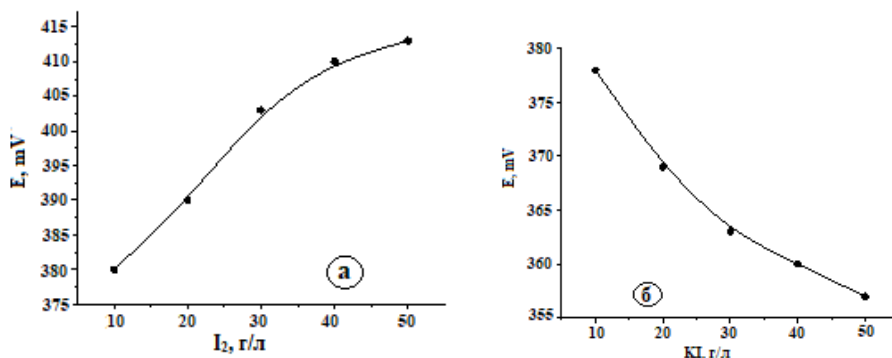
Сурет 1- Йод-йодид «red-ox» жұбын қолдану арқылы химиялық ток көзін жасауға (а) және графит электродының «red-ox» потенциалын өлшеуге арналған (б) қондырғылардың принципиалды схемасы.

Салыстырмалы электрод ретінде хлор-күміс электроды (6) қолданылды, потенциал мәні сол электродқа сәйкес, салыстырыла отырып, 1б - суретінде көрсетілген қондырғыда өлшенді. Калий йодидіне әрбір 5 мл йод ерітіндісі құйылған сайын графит электродының «red-ox» потенциалы өлшенді. Электролит магнитті араластырғыш және ротордың көмегімен араластырылды.

3. Зерттеу нәтижелері мен талқылануы

Химиялық ток көзі (ХТК) болып табылатын аккумуляторды жасауда, электродтарда жүретін реакциялар міндетті түрде қайтымды болуы керек. Әдетте, тотығу-тотықсыздану электродтарында жүретін реакциялар қайтымды болатындығы белгілі. ХТК жасау үшін тұйық жүйеде электролиттерге салынған потенциал мәндерінің айырмашылығы бар екі электрод болуы тиіс. Олай болса, мәндері әртүрлі «red-ox» электродтарын қолдану арқылы да ХТК жасауға болады деп жорамалдауға болады. Ал белгілі көлемде жиналған бұл электролиттерді электролизердің бір-бірінен мембранамен бөлінген екі кеңістігі арқылы өткізе отырып, электр сыйымдылығы өте жоғары аккумуляторлар жасауға болатындығын алдын-ала жүргізілген зерттеулер көрсетті.

Алғашқы зерттеулерде калий йодиді ерітіндісінің концентрациясы 10 г/л-ге тең болды. Оған йод ерітіндісін қосып отырған кездегі инертті графит электродының потенциалының өзгеруі 2а - суретте көрсетілген. Назар аударатын болсақ, ерітіндідегі йодтың концентрациясы 10 г/л болғанда, ерітіндінің red-ox потенциалының мәні 380.1 мВ, ал 50 г/л болғанда, 412.5 мВ болды.



Сурет 2 – Йод-йодид жүйесіндегі «red-ox» потенциалдың өзгеруіне KI (а) және I₂ (б) концентрацияларының әсері.

Зерттеу нәтижелері Нернст тендеуіне сәйкес, инертті графит электродының «red-ox» потенциалы мәнінің өсетінін көрсетті.

Келесі зерттеуімізде 10 г/л йод ерітіндісіне калий йодиді ерітіндісін біртіндеп қосқан кездегі потенциал мәнінің өзгеруі қарастырылды. Бұл кезде керісінше, ерітіндідегі калий йодиді концентрациясының өсуі, электродтың «red-ox» потенциалының мәнін теріс жаққа қарай ығыстырады. Бұл зерттеулеріміздің нәтижелері де Нернст тендеуіне сәйкес келіп отыр. Ерітінді құрамында 10 г/л йодид иондары болғанда, электрод потенциалының мәні 379.3 мВ болса, 50 г/л болғанда 357.5 мВ-қа тең болды (2б - сурет).

Ары қарай 1а - суретте көрсетілген электролизердің бір кеңістігіне (3) калий йодиді, ал екінші кеңістігіне (4) йод бар электролитті құйып, олардың концентрацияларын біртіндеп өзгерте отырып, олардағы екі электрод арасында түзілген электр қозғаушы күштің (ЭҚК) және қысқа тұйықталған ток (ҚТТ) мөлшерінің мәндеріне әсері зерттелді.

Калий йодиді бар кеңістіктегі графит электродында йодид иондарының тотығу реакциялары орын алады:



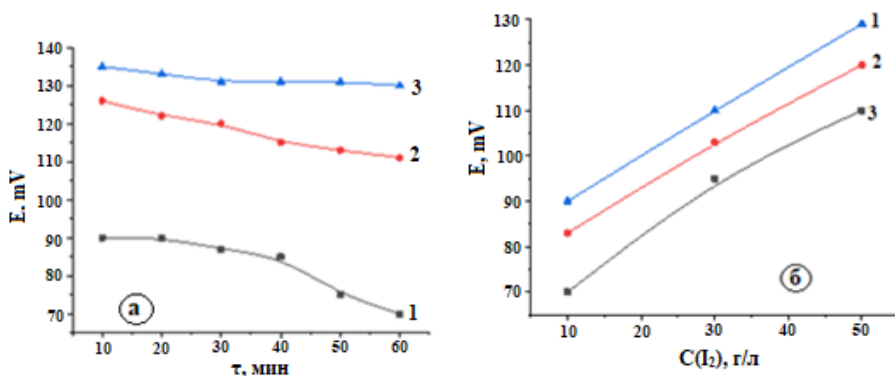
ал екінші кеңістіктегі электродта, йодтың тотықсыздану реакциясы орын алады:



Зерттеу кезінде гальваникалық элементтің екі электрод арасындағы пайда болған ЭҚК және ҚТТ мәнін анықтау 1-суретте көрсетілген қондырғыда іске асырылды. Екі электрод арасындағы электр қозғаушы күшті өлшеу үшін (8) кілтті ажыратып, (9) кілтті қосады. Осы жағдайда тізбекке параллель қосылған милливольтметр арқылы ЭҚК шамасын өлшеуге болады. Ал (9) кілтті ажыратып, (8) кілтті қосу арқылы, ҚТТ шамасы тізбекке жалғанған миллиамперметр арқылы өлшенеді. Бұл құбылысты Нернст тендеуі бойынша иондардың концентрацияларынан өзгеруіне байланысты деп түсіндіруге болады. Йод концентрациясынан өсуі

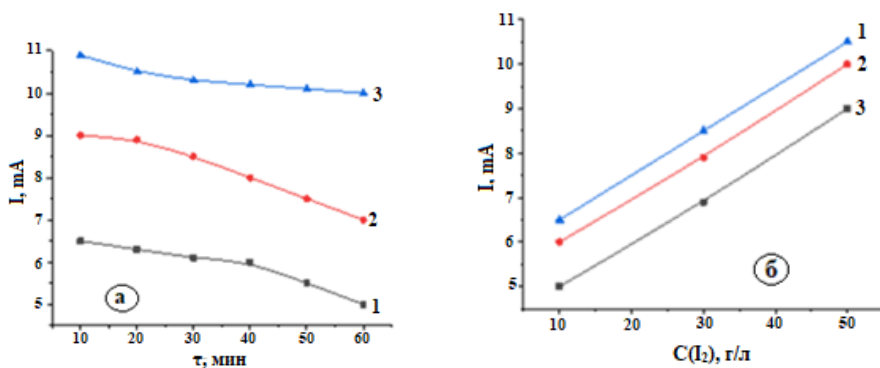
ЭҚК пен ҚТТ мәнін өсіреді, ал уақыт өткен сайын иондардың концентрациясы төмендейді.

Алғашқы зерттеу жұмыстары күкірт қышқылы қосылмаған йод-йодид сулы ерітінділерімен жасалынды және тәжірибе барысында ЭҚК пен ҚТТ мәндерінің өзгеруі тіркелді. Ал «йод-йодид» гальваникалық жүйесіне күкірт қышқылын қосқан кезде ЭҚК-тің және ҚТТ-тың мәні қарқынды өсетіні байқалды. Электролитке 50 г/л күкірт қышқылын қосқан кезде ЭҚК мәндерінің 45 мВ-тен жоғары болатынды, ал ҚТТ 10 еседей өсетіндігі байқалды (3,4- суреттер). Бұл құбылыс ерітінді электр өткізгіштігінің өсуімен тікелей байланысты.



[KI] = 10 г/л, H₂SO₄ = 50 г/л, t = 25 °C

Сурет 3 - «Йод-йодид» жүйесіндегі ЭҚК-нің мәніне уақыттың (а) және йод концентрациясының (б) әсері: а - йод, г/л: 1 - 10; 2 - 20; 3 - 30; 4 - 40; 5 - 50, б - τ, мин: 1 - 10; 2 - 30; 3 - 60.

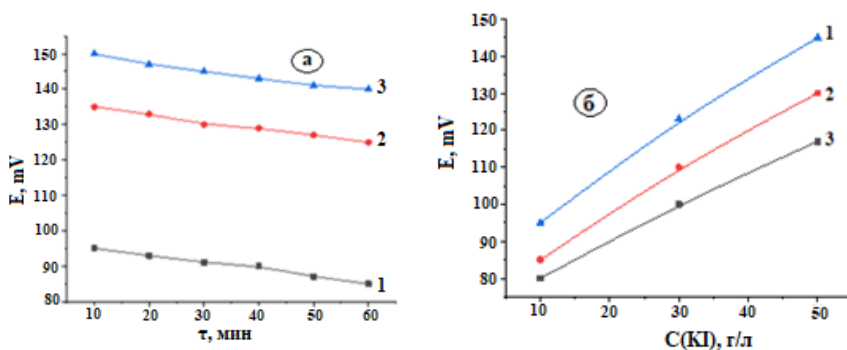


[KI] = 10 г/л, H₂SO₄ = 50 г/л, t = 25 °C

Сурет 4 - «Йод-йодид» жүйесіндегі ҚТТ-тың мөлшеріне уақыттың (а) және йод иондарының (б) концентрациясының әсері: а - йод, г/л: 1 - 10; 2 - 30; 3 - 50, б - τ, мин: 1 - 10; 2 - 30; 3 - 60.

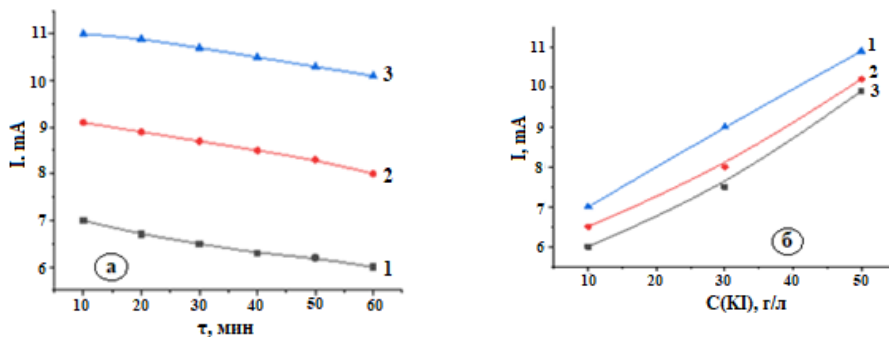
Бұл зерттеулерде «йод-йодид» гальваникалық жұбында, электролизердің бір кеңістігінде йод концентрациясын тұрақты етіп ұстап, екінші кеңістігіндегі йодид иондарының концентрациясы өзгерген кездегі ЭҚК және ҚТТ мәндерінің өзгеру заңдылықтары зерттелді. Электролизердің бір жартылай кеңістігінде йодид иондарының концентрациясының өсуі, бұл жағдайда да ЭҚК-тің және ҚТТ-тың мәндерінің Нернст теңдеуіне сәйкес өсетіні байқалады. Уақыт артқан сайын гальваникалық элементтің негізгі көрсеткіштерінің төмендеуін осы иондардың концентрацияларының төмендеуімен түсіндіруге болады.

Зерттеу нәтижелерін талқылай келе, «йод-йодид» red-ox қайтымды реакциялар жүйесін қолдану арқылы гальваникалық элемент жасауға болатындығы көрсетілді. Электродтық кеңістіктері мембрана арқылы бөлінген электролизерді қолданып, олардың әрбір кеңістігін йод немес йодид иондары бар ерітіндімен толтырып, инертті графит электродтарын салып, химиялық ток көзін жасауға болатындығын зерттеу нәтижелері көрсетті. Әрбір гальваникалық элементтің ЭҚК-нің және ҚТТ-тың мәндері сәйкесінше 135 мВ және 10 мА-ге тең болатындығы көрсетілді. Бұл жағдайда да, электролитке күкірт қышқылын қосқан кезде ЭҚК-тің және ҚТТ-тың мәндері күрт өседі (5,6- суреттер).



$[I_2] = 10 \text{ г/л}, H_2SO_4 = 50 \text{ г/л}, t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Сурет 5 - «Йод-йодид» жүйесіндегі ЭҚК-нің мәніне уақыттың (а) және йодид иондарының концентрациясының (б) әсері: а - $[KI]$, г/л: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 5 – 50, б – τ , мин: 1 – 10; 2 – 30, 3 – 60.



$[I_2] = 10$ г/л, $H_2SO_4 = 50$ г/л, $t = 25$ °C

Сурет 6 - «Йод-йодид» жүйесіндегі ҚТТ-тың мөлшеріне уақыттың (а) және йодид иондарының (б) концентрациясының әсері: а - $[KI]$, г/л: 1 - 10; 2 - 30; 3 - 50, б - τ , мин: 1 - 10; 2 - 30, 3 - 60.

Йод және йодид иондары бар тотығу-тотықсыздану жүйесін қолдану арқылы гальваникалық элементтер жиынтығын қолданып, қуатты химиялық ток көзін жасауға болатындығы анықталды. Йод және йодид иондары бар ерітінділерді қолдану арқылы сыйымдылығы өте жоғары ағынды аккумулятор жасауға болатындығын зерттеу нәтижелері нақты көрсетті.

Табиғаты бірдей, бірақ әртүрлі валентті иондарды ағынды ток көздерін жасауда қолдану, электролиттердің бір-бірімен кездейсоқ араласып кетуі айтарлықтай проблемаларды туғызбайды. Бұл ағынды химиялық ток көздерін қолдану арқылы қарапайым ХТК іске асыруды оңайлатады. Нәтижесінде “ $I_2 - I^-$ » «red-ox» жұбын қолдану арқылы ағынды химиялық ток көзін жасауға болатындығы анық көрсетілді.

4. Қорытынды

Қорыта айтқанда, «йод – йодид» «red-ox» жүйесін және графит электродтарын қолдану арқылы, электродтық кеңістіктері анионитті мембранамен бөлінген электролизерді пайдаланып, химиялық ток көзін жасауға болатындағы айқын көрсетілді. Екі электрод кеңістігіндегі тотыққан және тотықсызданған иондардың концентрацияларының және олардың ара-қатынасына байланысы, сәйкесінше, белгілі бір мөлшердегі электр қозғаушы күш пайда болатыны анықталды. Электролизердің әрбір кеңістіктеріндегі йод және йодид иондарының концентрацияларының өзгеруінің ЭҚК және ҚТТ мәндеріне әсері зерттелді. Нәтижесінде, осындай қондырғыны химиялық ток көзі ретінде қолдануға болатындығы көрсетілді. Оптималды жағдайда гальваникалық элементтің ЭҚК және ҚТТ-тың мәндері, сәйкесінше, 135 мВ және 10 мА – ден жоғары болатындығы көрсетілді.

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

СОЗДАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ В СИСТЕМЕ "ЙОД-ЙОДИД"А.К. Баешова¹, У.А. Ораз^{1*}, А. Баешов²¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан² «Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан», Алматы, Казахстан*E-mail: alhanovna.u@gmail.com

Резюме. *Введение.* Химические источники тока играют важную роль в системах энергоснабжения, тесно связанных с повседневной жизнью. Постоянно растущая зависимость от электроэнергии создает огромный спрос на соответствующие устройства хранения энергии. *Цель работы:* Целью работы является создание химического источника тока на основе применения «red – ox» системы йод-йодид и определение закономерностей формирования величин электродвижущей силы (ЭДС) и тока короткого замыкания (ТКЗ) в водном растворе в зависимости от концентрации ионов. *Методология.* 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 растворы йода и йодида калия. *Результаты и обсуждение:* В электролизере, электродные пространства которого разделены анионитовой мембраной, при заполнении одного пространства йодом, а другого – йодидом калия, между графитовыми электродами возникает ЭДС. В оптимальных условиях значения ЭДС и ТКЗ будут выше 135 мВ и 10 мА соответственно. *Заключение.* Показана возможность формирования химического источника тока с использованием «red – ox» системы йод-йодид. Выявлены закономерности образования ЭДС и ТКЗ и изменения их в зависимости от концентраций ионов. Результаты исследования показывают, что «red – ox» системы переменновалентных элементов могут быть использованы для создания проточных химических источников тока с повышенной электроемкостью.

Ключевые слова: йод, йодид-ионы, электродвижущая сила, ток короткого замыкания, электролит, графит, электрод.

<i>Баешова Ажар Коспановна</i>	<i>Доктор технических наук, профессор</i>
<i>Ораз Улжан Альхановна</i>	<i>Магистр, докторант</i>
<i>Баешов Абдуали</i>	<i>Доктор химических наук, профессор, академик НАН РК</i>

Әдебиеттер тізімі

1. Баешов А., Баешова А.К., Баешова С.А. Электрохимия (теориясы мен қолданылуы): оқу құралы, Қаз. Универ. **2020**, 312. <https://ebin.pub/9786010400740.html>
2. Нижниковский Е.А., Шимченко В.А., Кузовов В.В. Обеспечение резервного электропитания автономной радиоэлектронной аппаратуры длительного действия. *Электрохим. Энерг.*, 2000, **1**, 68–73. <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/522/52251ebb9d235ea922132b35e71d7de8/201002012.pdf>
3. Kim E. et al. Ionic liquid electrolytes for electrochemical energy storage devices. *Materials*. **2021**, **14**. <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/14/4000>
4. Zhang K., Jin Z. Halogen-enabled rechargeable batteries: Current advances and future perspectives. *Energy Stor. Mat.* **2022**, **45**, 332-369. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2405829721005651>
5. Li J., Xu Z., Wu M. Halogen enabled aqueous flow cells for large-scale energy storage: current status and perspectives. *Jour. of Power Sour.* **2023**, **581**, 233477. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775323008534>
6. Petrov M. M. et al. Redox flow batteries: Role in modern electric power industry and comparative characteristics of the main types. *Russ. Chem. Rev.* **2021**, **90**(6), 677. <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/RCR4987/meta>

7. Jang W. J. et al. Effect of an iodine film on charge-transfer resistance during the electro-oxidation of iodide in redox flow batteries. *ACS App. Mat. & Inter.* **2021**, 13(5), 6385-6393. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsami.0c22895>
8. Агафонов Д.В., Эрк А.Ф. Выбор химического источника тока для буферной батареи возобновляемых источников энергии. *АгроЭкоИнженерия* **2018**, 26–33. <https://cyberleninka.ru/article/n/tselesoobraznost-ispolzovaniya-solnechnyh-elektrostantsiy-na-selskih-territoriyah>
9. Zhang L. et al. Metal–iodine batteries: achievements, challenges, and future. *Ener. Environ. Sci.* **2023**, 16(11), 4872-4925. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/ee/d3ee01677c>
10. Ishita I. et al. Unlocking the potential of KI as redox additive in supercapacitor through synergistic enhancement with H₂SO₄ as a co-electrolyte. *Electr. Acta.* **2023**, 451, 142286. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013468623004668>
11. Abhijith P. P. et al. I Electrochemical Energy. *Pol. and Cer. Elect. for Ener. Stor. Dev.* **2021**, 1. https://scholar.google.com/scholar?cluster=12905040904522512415&hl=ru&as_sdt=0,5&as_ylo=2020
12. Modestov A., Andreev V., Antipov A. Aluminum. Bromate and Aluminum. Iodate Mechanically Rechargeable Batteries. *Batteries* 2022. **2022**, 8, 270. <https://www.academia.edu/download/97282322/pdf.pdf>.

References

1. Baeshov A., Baeshova A.K., Baeshova S.A. Elektrohimiya (teoriyası men koldanylyu): oku kuraly. *Kaz. Univer.*, **2020**, 312. <https://ebin.pub/9786010400740.html>
2. Nizhnikovskij E.A., Shimchenko V.A., Kuzovov V.V. Obespechenie rezervnogo elektropitaniya avtonomnoj radioelektronnoj apparatury dlitel'nogo dejstviya. *Elektrohim. Ener.*, **2000**, 1, 68–73. <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/522/52251ebb9d235ea922132b35e71d7de8/201002012.pdf>
3. Kim E. et al. Ionic liquid electrolytes for electrochemical energy storage devices. *Materials.* **2021**, 14. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2405829721005651>
4. Zhang K., Jin Z. Halogen-enabled rechargeable batteries: Current advances and future perspectives. *Energy Stor. Mat.* **2022**, 45, 332-369. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2405829721005651>
5. Li J., Xu Z., Wu M. Halogen enabled aqueous flow cells for large-scale energy storage: current status and perspectives. *Jour. of Power Sour.* **2023**, 581, 233477. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775323008534>
6. Petrov M. M. et al. Redox flow batteries: Role in modern electric power industry and comparative characteristics of the main types. *Russ. Chem. Rev.* **2021**, 90(6), 677. <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/RCR4987/meta>
7. Jang W. J. et al. Effect of an iodine film on charge-transfer resistance during the electro-oxidation of iodide in redox flow batteries. *ACS App. Mat. & Inter.* **2021**, 13(5), 6385-6393. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsami.0c22895>
8. Агафонов Д.В., Эрк А.Ф. Выбор химического источника тока для буферной батареи возобновляемых источников энергии. *АгроЭкоИнженерия*. **2018**, 26–33. <https://cyberleninka.ru/article/n/tselesoobraznost-ispolzovaniya-solnechnyh-elektrostantsiy-na-selskih-territoriyah>
9. Zhang L. et al. Metal–iodine batteries: achievements, challenges, and future. *Ener. Environ. Sci.* **2023**, 16(11), 4872-4925. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/ee/d3ee01677c>
10. Ishita I. et al. Unlocking the potential of KI as redox additive in supercapacitor through synergistic enhancement with H₂SO₄ as a co-electrolyte. *Electr. Acta.* **2023**, 451, 142286. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013468623004668>
11. Abhijith P. P. et al. I Electrochemical Energy. *Pol. and Cer. Elect. for Ener. Stor. Dev.* **2021**, 1. https://scholar.google.com/scholar?cluster=12905040904522512415&hl=ru&as_sdt=0,5&as_ylo=2020
12. Modestov A., Andreev V., Antipov A. Aluminum. Bromate and Aluminum. Iodate Mechanically Rechargeable Batteries. *Batteries* 2022. **2022**, 8, 270. <https://www.academia.edu/download/97282322/pdf.pdf>.