

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-66](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-66)



FTAXP: 61.31

А.К. Баешова*, С. Молайган¹, А.Б. Баешов¹, Р.М. Есетов¹, Б. Леска²

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті,
физика-химиялық зерттеу және талдау орталығы,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., әл-Фараби даңғылы, 71

²Адам Мицкевич университеті,
61-614, Польша, Познань, Uniwersytetu Poznanskiego k-ci, 8
*e-mail: azhar_b@bk.ru

СУЛЫ ЕРІТІНДІЛЕРДЕ АЛЮМИНИЙ ПЛАСТИНАСЫНДА СУТЕК БӨЛІНУ РЕАКЦИЯСЫНА ОРТАНЫҢ ӘСЕРІ

Аңдатпа: Сутек алудың баламалы және тиімді тәсілдерін әзірлеу қазіргі заманғы маңызды ғылыми-техникалық міндеттердің бірі болып табылады. Перспективалы бағыттардың бірі – алюминийдің сумен әрекеттесуі нәтижесінде сутек алу; алайда алюминий бетінде тұрақты оксидтік қабықшаның болуы әдеттегі жағдайларда реакцияның жүруіне кедергі келтіреді. Осы жұмыстың мақсаты фосфор немесе күкірт қышқылдарының сулы ерітінділеріне натрий хлоридін қосу арқылы алюминий бетін белсенділендіру және сутектің бөліну жылдамдығын анықтау. Эксперименттік зерттеулерде фосфор немесе күкірт қышқылдары, химиялық тазалықтағы натрий хлориді және А85 маркалы алюминий қолданылды. Сутек газын алу зертханалық жағдайда шкаласы бар шыны бюретка типті қондырғыда жүргізілді. Бөлінген сутектің көлемі бюреткадан ығыстырылған судың көлемі бойынша анықталды. Қышқылды сулы ерітінділерге натрий хлоридін қосқанда, алюминий бетінің оксидтік қабықшасы бұзылып, оның сумен әрекеттесуі орын алды. Хлорид-иондардың әсерінен алюминийдің локалды еруі нәтижесінде кеуекті және біртекті емес бет қалыптасып, сутектің бөліну қарқындылығы едәуір артты. Фосфор қышқылының 1-7 моль·л⁻¹ концентрацияларында сутектің бөліну жылдамдығы 8 мл·сағ⁻¹·см⁻²-ден аспайды, алайда натрий хлоридін (25 г·л⁻¹) қосқанда ол 50,02 мл·сағ⁻¹·см⁻²-ге дейін өсіп, 6,25 есе артатыны анықталды. Күкірт қышқылының 0,5-2,5 моль·л⁻¹ концентрацияларында натрий хлориді бар ортада сутектің бөліну жылдамдығы 25,27-ден 108,38 мл·сағ⁻¹·см⁻²-ге дейін өсіп, шамамен 5 есе артады. Сонымен, натрий хлориді қосылған қышқылды сулы ерітінділерде бөлме температурасында алюминий бетінде сутек алу мүмкіндігі көрсетілді. Алюминий бетін белсенділендірудің ұсынылып отырған әдісі арзан, әрі қолжетімді реагенттерді қолдануға негізделген, оның арасында алюминий сынықтарын пайдалану арқылы автономды сутек өндіру жүйелерін дамыту үшін перспективалы болып табылады.

Түйін сөздер: алюминий, сутек, жылдамдық, фосфор қышқылы, натрий хлориді, күкірт қышқылы

Кіріспе

Бүгінгі таңда сутектік энергетикаға қызығушылықтың бүкіл әлем бойынша жоғары деңгейде артуын соңғы жылдардағы жарияланымдар көрсетеді. Мысалы, Arsad A.Z. және т.б. шолуында [1] HydESS жүйелерінің жаңартылатын энергия көздерімен біріктірілгендегі энергетикалық тұрақтылықтағы рөлі көрсетіліп, негізгі зерттеу бағыттары айқындалған. Басқа әдебиет көздерінде [2-5] сутектік энергетиканың маңыздылығы сипатталған. Солардың арасында [2, 3] Scopus деректері негізінде сутек энергетикасы мен сутекті сақтау саласындағы жаһандық ғылыми үрдістерге библиометриялық талдаулар жасалған. Бір авторлар [4] сутектік энергетиканы дамыту жолындағы қиындықтарды атап өтсе, басқалары [5] энергияның бұл

түрінің әлеуметтік маңызына тоқтаған. Сутектің қолдану аясының кеңдігі жылдан-жылға артып келетіні туралы деректер де әдебиетте көп кездеседі. Мысалы, мына зерттеулерде [6-8] сутек қозғалтқыштарының дамуы, оларды қолданудағы негізгі қиындықтар және нөлдік көміртек шығарындыларына жетудегі әлеуеті қарастырылған. Жаңадан шыққан еңбектерде де сутекке байланысты өзекті мәселелер назардан тыс қалмаған. Сутекті сақтау мен тасымалдаудың құнын төмендету үшін әртүрлі технологиялардың технико-экономикалық тиімділігі салыстырмалы түрде талданған [9].

Сутектік энергетиканы дамытуда сутек газын алу әдістерін жасау және жетілдіру өзекті мәселелердің бірі болып табылады. Біз жариялаған шолуларда [10, 11] сутек алудың барлық әдістерін сипаттаған болатынбыз. Әдебиет көздерін зерттеу және талдау нәтижесінде сутекті металл ұнтақтарын немесе олардың құймаларын, әсіресе алюминийді, сумен әрекеттестіру арқылы алу, көңіл қоярлық мәселе екеніне көзіміз жеткен. Алюминийдің бетінде оксидтік қабаттың болуына байланысты, оның сумен әрекеттесу реакциясы әдеттегі жағдайларда жүрмейтіні белгілі. Сол себептен, әрқашан алюминий бетіндегі оксидтік қабатты жойып, оның бетін белсенділендіріп отыру қажет. Осы орайда, әдебиетте алюминий бетін белсенділендіру мүмкіндіктері қарастырылған. Мысалы, сулы-сілтілі ерітінділермен, жоғары температура немесе жоғары қысымдарды пайдалану арқылы, галлий-индий құймаларын қолдану сияқты әдістерді пайдалану жөнінде мәліметтер кездеседі [12].

Сонымен бірге бастапқы шикізат ретінде алюминийдің майдаланған ұнтағын қолдану және оны құрғақ күйде тұз кристалдарымен белсенділендіру, соңынан суда еріту сияқты әдістер де ұсынылған [13]. Бірақ, алюминий ұнтағын алу – процесті күрделендіре түседі, көп сатылылық орын алады және өте майда дисперсті ұнтақтармен реакциялар жүргізу кезінде жылдамдықтың күрт артуы қауіптілікті де арттырады. Ал басқа зерттеушілер, алюминий ұнтақтарын тұзбен белсенділендірумен қатар, реакция кезінде бөлінетін жылуды пайдалануды ұсынады [14]. Алюминий бетін белсенділендіру мәселелеріне арналған шолулар да аз емес. Ол еңбектерде сілті ерітінділерін пайдалану, шар диірменінде ұнтақталған алюминийге хлоридтерді қосу сияқты әдістер сипатталған және олардың артықшылықтары мен кемшіліктері көрсетілген [15-20]. Мысалы, алюминийдің беттік қабатының сумен әрекеттесудегі ең басты кедергі екенін айта келе, шолу жасаған авторлар [15], келешекте тиімділікті арттыру үшін алюминий сынықтарын пайдалануды ұсынады. Кейбір зерттеулерде [16, 17] судан алюминий арқылы сутек алудың әдістерінің артықшылықтары мен кемшіліктерін қарастырып, салыстырулар келтірілген. Алюминийден жасалған бұйымдарды суықта өндеп, соңынан қыздырылған галлий-индий құймасын қосу арқылы да сутек алу ұсынылған [18]. Алюминий ұнтақтарын түрлі вариацияларда, оның арасында, алюминий қалдықтарынан алынған түрін (AWCR) пайдаланып, механикалық жолмен белсенділендіріп, сумен әрекеттестіріп, сутек алуға болатыны көрсетілген [19]. Әдебиетте кездесетін шолуда [20] түрлі тұздар қосып, алюминийдің реакцияға түсу қабілетін жоғарылату үшін оның бетін белсенділендіріп, сутек алуды сипаттаған және экономикалық тұрғыдан талдаулар жасалған. Дегенмен, бұл әдістер экологиялық тұрғыдан қауіпті, оларды іске асыру қиын және қымбатқа түсетіні де баяндалады. Біз бұрынғы жұмыстарымызда [21, 22] алюминий бетін сынап тұзымен белсенділендіру және деполяризатор-материалдарды қолдану арқылы судан сутек алу әдісін іске асырған едік. Бұл әдістерде бөлме температурасында сутек газының бөліну жылдамдығын айтарлықтай жоғарылатуға қол жеткіздік.

Осы жұмыстың негізгі мақсаты алюминий бетін сулы ерітінділерде фосфор қышқылына немесе күкірт қышқылына натрий хлоридін қосу арқылы белсенділендіру және сутек газының бөліну жылдамдығын анықтау болып табылады.

Зерттеу әдістері

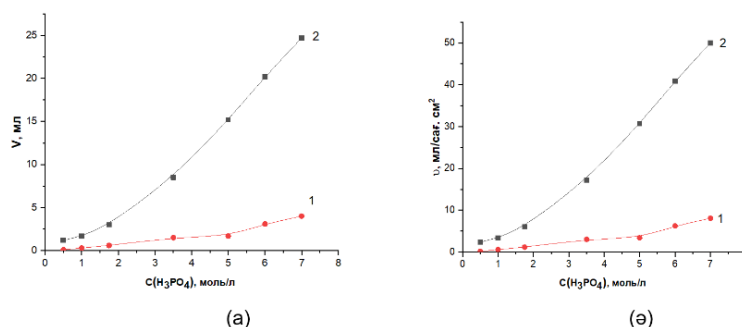
Сулы ерітінділерден сутек алу мақсатында «х.т» маркалы ортофосфор, күкірт қышқылдары, натрий хлориді қолданылды. Қолданылған алюминийдің (пластина түрінде) маркасы А85, тазалығы 99,85%-ке тең. Эксперимент алдында алюминий пластинасы Matrix 1000, содан кейін Mirka Finland 2000 түрпі қағаздарымен тазаланып, сумен шайылып, этил спиртімен сүртіліп, майсыздандырылды. Сутек алу әдісі біздің бұрынғы жұмыстарымызда [21, 22] көрсетілген лабораториялық қондырғыда іске асырылды. Арнайы шкаламен жабдықтандырылған, шыныдан жасалған бюретка аударылып, ерітінді құйылған кең ыдыстың бетіне штатив арқылы орналастырылды. Бұл ыдыстың түбіне алюминий пластинасы орналастырылды. Аударылып, теріс қойылған бюретканың төменгі жағына төңкерілген воронка орналастырылды. Олар су құйылған кең ыдысқа батырылды. Бюретка сумен

толтырылды. Суға фосфор қышқылын және натрий хлоридін қосқан кезде судан сутек бөлінеді де, бюреткаға жиналады, су төмендегі ыдысқа ығыстырылады. Сутек көлемі, ығыстырылған судың көлеміне теңестіріледі. Сутектің көлемін қалыпты жағдайға келтіріп отырдық. Қолданылған алюминий пластинасының бетінің өзгерісін қадағалау мақсатында JSM 6610 LV (JEOL, Жапония) сканерлеуші электронды микроскопта микрофотографиялар түсірілді. Реакция жүргізу барысында алюминий пластинасының потенциалының өзгеруін қадағалау В7-78/2 әмбебап цифрлық вольтметрмен хлор-күміс электродына салыстырмалы түрде іске асырылды.

Барлық тәжірибелер бөлме температурасында (әдетте 25°C) жүргізілді, температураны реттегіші бар магниттік араластырғыш (OC40-Pro) арқылы бір қалыпта ұстап тұрдық.

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Фосфор қышқылы, сатылап диссоциацияланатын, орташа күшке ие электролит болып табылады. Ол сулы ортада, негізінен, бірінші саты бойынша, сутек және дигидрофосфат иондарын түзе диссоциацияланады, тотықтырғыш қасиеті жоқ, металдармен әрекеттескенде, аса жоғары белсенділік танытпайды. Бұл тұжырым алюминийге де қатысты. Біз алюминий пластинасын фосфор қышқылының әртүрлі концентрациялы ерітінділеріне салып, бөлінетін сутек көлемін және сутек бөліну жылдамдығын анықтадық. 1-суретте көрсетілгендей, фосфор қышқылының концентрациясы 1-7 моль/л аралығында өзгертілгенде, сутек өте аз мөлшерде бөлінеді. Тәжірибе 3,5 минут (0,06 сағ.) бойы жүргізілген кезде, бөлінетін сутектің көлемі 4 мл-ден аспады (сурет 1а, 1-қисық) және бұл газдың бөліну жылдамдығы 8 мл/сағ. · см²-ге дейін ғана жетті (сурет 1ә, 1-қисық). Ал дәл осындай жағдайларда ерітіндіге 25 г/л NaCl қосқан кезде, сутектің қарқынды түрде бөлінгенін байқаймыз. Демек, бұл кезде бөлінетін газдың көлемі 24,7 мл құраған болса (сурет 1а, 2-қисық), жылдамдығы 50,02 мл/сағ. · см²-ге жетті (сурет 1ә, 2-қисық). Процестің қарқындылығы жуық шамамен 6 есе артқанын көріп отырмыз.

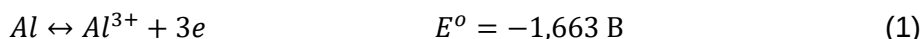


τ = 0,06 сағ., S (Al) = 8,23 см²

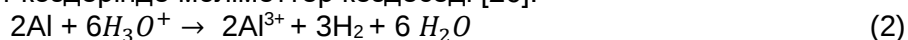
1 сурет – а) алюминий пластинасында бөлінетін сутек көлеміне фосфор қышқылының концентрациясының әсері; ә) сутектің бөліну жылдамдығына қышқыл концентрациясының әсері. Екі суретте де: 1 қисық – тек фосфор қышқылымен әрекеттесу; 2-қисық – фосфор қышқылына 25 г/л NaCl қосқан кезде

Бұл нәтижелерді түсіндіру үшін алюминийдің пассивтелу механизмін қарастырайық. Әдебиетте келтірілген деректер бойынша, алюминийдің және оның құймаларының пассивтелуі үшін небәрі ең басында жұқа моноқабаттың болуы жеткілікті. Бұрынғы зерттеушілердің пікірі бойынша, пассивтелудің термодинамикалық тұрғыдан аса тиімді процесс екенін ескеретін болсақ, ең соңында бүтін түрде моноқабат түзіледі де, алюминий беті толық пассивацияға ұшырайды. Оксидтік қабаттың қалыптасуына байланысты, алюминий бетіне тотықтырғыштың (су, гидроксил-иондар) жетуі тежеледі де, алюминийдің еруі диффузиялық шектеулермен іске асады. Алюминийдің коррозияға ұшырауы, оның арасында анодтық поляризация кезінде тотығуы, осы процеске қандай қосылыстар немесе факторлар әсер ететіні жөніндегі ғылыми зерттеулер әдебиетте көп кездеседі [23-26].

Біз қолданып жүрген әдеттегі алюминий пластиналары болғандықтан, олар әрқашан оксидтермен қапталған. Сол себепті, сулы ортада алюминийдің еруі аса қиындатылған процесс болып табылады. Ал осы тәжірибемізде фосфор қышқылының сулы ерітінділеріне натрий хлоридін қосқан кезде, алюминий бетіндегі оксидтік қабат бұзылады да, алюминий, электртерістілігі жоғары металл ретінде ($E^0 = -1,663$ В) ериді (реакция 1).



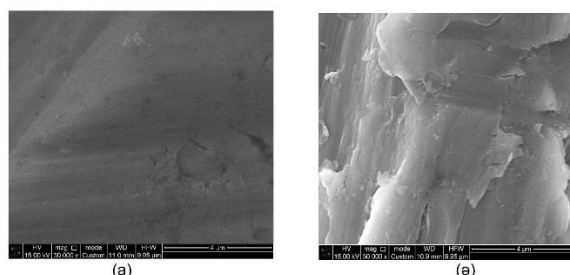
Мұның себебі, ерітіндіге қосылған хлор иондарының рөліне байланысты. Белгілі зерттеулердің кейбіріне сүйенетін болсақ [25], хлорид-иондар классикалық тұрғыдан алюминий бетін белсендіруші болып табылады және оның анодтық еруіне қарқынды түрде ықпалын келтіреді. Қышқылды ортада алюминийдің еруі сутек бөлінуіне (реакция 2) әкелетіні туралы әдебиет көздерінде мәліметтер кездеседі [26].



Хлорид-иондардың белсендіргіш әсері металл бетіндігі оксидтік қабаттың тасымалдануымен байланысты және электрод бетінде оттегі атомдарын ығыстыра отырып, адсорбциялануымен негізделеді. Депассивация нақты белсендірілген учаскелерде басталады, соңынан бұл процеске басқа да учаскелер тартыла бастайды деген тұжырымдар әдебиетте [27] келтірілген. Пассивацияның белгілі бір фактордың әсерімен бұзылуы белсенділік танытатын қабырғалар арқылы қарқынды түрде орын алады, содан кейін басқа да, белсенділігі төмен болып келетін, қабырғалар процеске түсе бастайды. Мысалы, ерітіндіге хлор иондары енгізілген кезде, алюминийдің пассивтілігін осы хлор иондары бұза бастайды. Хлорид-иондар алдымен пассивті қабаттың бетіне қонады (адсорбцияланады), соңынан осы қабатқа сіңіріледі де, оны бұзады, содан кейін алюминиймен $[AlCl_4]^-$ кешен түзе реакцияға түседі. Осы аниондардың пассивтеуші оксидтермен әрекеттесуінің қайтымдылығы жойылады да, локалды түрде түзілген, депассивацияланған нүктелерде питтингтер пайда болады. Содан кейін алюминийдің реакцияға түсуінің де қарқындауы орын алады. Айта кететін мәселе, алюминийдің электрохимиялық жолмен еруі өте жиі зерттелген. Осы зерттеулердегі тұжырымдарды химиялық еруіне де қолданып отырмыз, себебі, металдың сулы ерітінділерде еруі тотығу-тотықсыздану реакциясы ретінде қарастырылады, демек, анодтық еру деп түсіндіріледі.

Алюминийді фосфор қышқылының ерітіндісіне батырған кезде көзге көрінетін сутек газының көпіршіктері байқалмайды. Ал енді осы пластинаның СЭМ микрофотосуреттеріне көңіл бөлсек, 2 а суретте оның беті бір текті, көзге түсетін кеуектер, шұңқырлар байқалмайды. Фосфор қышқылының күші орташа екенін және алюминий фосфатының аз еритінін ескерсек, алюминий бастапқы кезде аз ериді де, оның иондары фосфат иондарымен әрекеттеседі деп тұжырымдауға болады. Сол кезде түзілген алюминий фосфаты пластина бетін айтарлықтай пассивтейді де, реакция өте баяу жүреді. 1 а, ә-суреттерде алюминийде бөлінетін сутек газының көлемінің және оның бөліну жылдамдығының өсуі фосфор қышқылының концентрациясына байланысты көрсетілген.

Ал алюминийді фосфор қышқылының натрий хлориді қосылған ерітіндісіне батырғаннан кейінгі микрофотосуретте (сурет 2 ә) пластина бетінің айтарлықтай өзгерістерге ұшырағанын көруге болады. Алюминий бетінде оның локалды түрде еруінің нәтижесінде түзілген терең шұңқырлар мен кратерлер, терең жолақтар кеуекті және бір текті емес беттік аудан – қарқынды ерудің нәтижелерін байқатады. Фосфор қышқылы ерітіндісіне натрий хлоридін қосқан кезде, алюминийдің бетіндегі оксидтік пленканың бұзылуын және бұл металдың қарқынды түрде еруін оның потенциалының теріс мәндер аумағына ығысуы да дәлелдейді. Хлор-күміс салыстырмалы электродын пайдаланып, В7-78/2 эмбебап вольтметр көмегімен өлшенген потенциал мәндері алюминий потенциалының -1,062 В-тен -1,264 В-ке дейін өзгергенін көрсетеді. Бұл өлшеулер 7М H_3PO_4 ерітіндісінде жүргізілді (температура 25°C).



Сурет 2 – Алюминийдің беттік қабатының 30 000 есе үлкейтілген СЭМ фотосуреті
а – фосфор қышқылының ерітіндісіне батырылғаннан кейін кептірілген күйі; ә – фосфор қышқылына натрий хлориді қосылған ерітіндіге батырылғаннан кейін кептірілген күйі

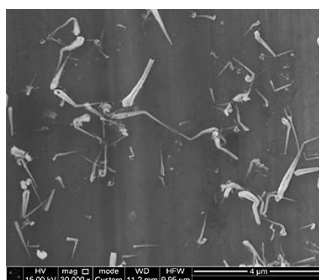
Сутек бөліну реакциясын алюминий пластинасында күкірт қышқылында да жүргіздік. Әрине, бұл қышқылда алюминий әдеттегі жағдайларда ерімейтіні белгілі. Ал біз жүргізген зерттеулерде күкірт қышқылына NaCl қосып, сутек бөліну жылдамдығын есептеген кезде, сутек қарқынды түрде бөлінетіні анықталды.

1-кестеден көрініп тұрғандай, алюминий күкіртқышқылды ортамен NaCl қатысында қарқынды түрде, сутек бөле, әрекеттеседі. Сутек бөліну жылдамдығы күкірт қышқылының 0,5-2,5 моль/л-ге тең концентрацияларының интервалында айтарлықтай артады да, содан кейін аздап, кеми бастайды.

Кесте 1 – Алюминийдің күкірт қышқылы ерітіндісімен NaCl қатысында әрекеттесуі кезінде бөлінетін сутек көлемі және оның бөліну жылдамдығы: $t = 0,05 \text{ сағ.}$, $C(\text{NaCl}) = 25 \text{ г/л}$, $S(\text{Al}) = 8,23 \text{ см}^2$

$C(\text{H}_2\text{SO}_4)$, моль/л	NaCl қатысында бөлінетін сутек көлемі, мл	NaCl қатысында сутек бөліну жылдамдығы, мл/сағ·см ²
0.5	10.4	25.27
1.0	24.7	60.02
1.5	36.4	88.45
2.0	45.3	110.08
2.5	52.1	126.60
3.0	44.6	108.38

Алюминийді натрий хлориді қосылған аз концентрациялы күкірт қышқылына батырғаннан кейінгі СЭМ фотосуретке (сурет 3) көңіл бөлсек, хлор иондарының қарқынды түрде алюминий бетінің пассивтілігін бұзатыны, реакцияның қарқынды түрде жүретіні расталады.



Сурет 3 – Алюминийдің беттік қабатының 30 000 есе үлкейтілген СЭМ фотосуреті: күкірт қышқылына натрий хлориді қосылған ерітіндіге батырылғаннан кейін кептірілген күйі

Қорытынды

Келтірілген тәжірибелердің нәтижелері лабораториялық жағдайда, бөлме температурасында қарапайым қондырғыда алюминий пластинасында сулы ерітінділерден сутек бөліну мүмкіндігін көрсетті. Әдетте суда пассивацияға ұшырайтын алюминий, натрий хлориді қосылған фосфор немесе күкірт қышқылының сулы ерітіндісінде, сутек бөле, қарқынды түрде еритіні анықталды. Осылай, әдетте өте пассивті болып табылатын, алюминийдің бетін белсенділендіру мүмкіндігі көрсетілді. Хлор иондарының қарқынды түрде алюминий бетінің пассивтілігін бұзатыны, шұңқырлық коррозия орын алатыны, питтингтер түзілетіні, сутек бөліну реакциясы жүретіні көрсетілді. Алюминий бетін белсенділендірудің ұсынылып отырған әдісі арзан, әрі қолжетімді реагенттерді қолдануға негізделген, оның арасында алюминий сынықтарын пайдалану арқылы автономды сутек өндіру жүйелерін дамыту үшін перспективалы болып табылады.

Әдебиеттер тізімі

1. Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions / A.Z. Arsal et al // Inter. Jour. of Hydro. Ener. – 2022. – № 47(39). – P. 17285-17312. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.208>.
2. Ozsari I. Trend analysis and evaluation of hydrogen energy and hydrogen storage research / I. Ozsari // Ener. Storage. – 2023. – № 5(6). – P. e471. <https://doi.org/10.1002/est2.471>.

3. Sustainability and challenges in hydrogen production: An advanced bibliometric analysis / B.D. Catumba et al // *Inter. Jour. of Hydro. Ener.* – 2023. – № 48(22). – P. 7975-7992. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.215>.
4. Fueling the future: A comprehensive review of hydrogen energy systems and their challenges / T.T. Le et al // *Inter. Journ. of Hydro. Ener.* – 2024. – № 54. – P. 791-816. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.044>.
5. Socio-economic aspects of hydrogen energy: An integrative review / G.D. Sharma et al // *Techno. Forecast. and Soc. Change.* – 2023. – № 192. – P. 122574. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122574>.
6. Hydrogen engine operation strategies: Recent progress, industrialization challenges, and perspectives / Z. Sun et al // *Inter. Jour. of Hydro. Ener.* – 2023. – № 48(1). – P. 366-392. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.256>.
7. Evro S. Carbon neutrality and hydrogen energy systems / S. Evro, B.A. Oni, O.S. Tomomewo // *Inter. Jour. of Hydro. Ener.* – 2024. – № 78. – P. 1449-1467. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.407>.
8. Sustainable hydrogen energy in aviation—A narrative review / T. Yusaf et al // *Inter. Jour. of Hydro. Ener.* – 2024. – № 52. – P. 1026-1045. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.086>.
9. Research on Storage and Transportation Cost Control and Technological Breakthroughs from the Perspective of Global Hydrogen Energy Development / Y. Gu et al // *Jour. of Sust. Built Environ.* – 2025. – № 2(5). – P. 33-38. <https://doi.org/10.70731/9ygthr89>.
10. Baeshova A.K. Sutekti sudan aludyn keibir belgili zhane zhana adisterinin salystyrmaly sipattamasy / A.K. Baeshova, S. Molajgan, A.B. Baeshov // *Vest. KazNPU im. Abaya, Estestv. – geogr. Nauki.* – 2018. – № 2 (56). – P. 22-27.
11. Bayeshova A.K. Hydrogen energetics current state and hydrogen production methods / A.K. Bayeshova, S. Molaigan, A.B. Bayeshov // *Izv. NAN RK. Ser. Him. i Tekh.* – 2018. – № 5. – P. 107-116. <https://doi.org/10.32014/2018>.
12. Milinchuk V.K. Avtonomnyj generator vodoroda na osnove himicheskogo razlozheniya vody alyuminiem / V.K. Milinchuk, E.R. Klinshpont, V.I. Belozarov // *Izv. Vys. Uch. Zav. Yader. Ener.* – 2015. – № 2. – P. 49-59.
13. Alinejad B. A novel method for generating hydrogen by hydrolysis of highly activated aluminum nanoparticles in pure water / B. Alinejad, K. Mahmoodi // *Inter. Jour. of Hydro. Ener.* – 2009. – № 34(19). – P. 7934-7938. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.028>.
14. Mahmoodi K. Enhancement of hydrogen generation rate in reaction of aluminum with water / K. Mahmoodi, B. Alinejad // *Inter. Jour. of Hydro. Ener.* – 2010. – № 35(11). – P. 5227-5232. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.016>.
15. An overview of hydrogen production from Al-based materials / L. Sun et al // *Nanotech. Rev.* – 2023. – № 12(1). <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0521>.
16. Kaur P. A critical assessment of aluminum-water reaction for on-site hydrogen-powered applications / P. Kaur, G. Verma // *Mat. Today Ener.* – 2024. – № 40. – P. 101-508. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2024.101508>.
17. Bolt A. A review of unique aluminum–water based hydrogen production options / A. Bolt, I. Dincer, Agelin-Chaab // *Energy & Fuels.* – 2021. – № 35(2). – P. 1024-1040.
18. Activation of bulk aluminum and its application in a hydrogen generator / J.T. Slocum et al // *Applied Energy.* – 2020. – № 279. – P. 115-712.
19. Hydrogen production via activated waste aluminum cans and its potential for methanation / S.T. Lim et al // *Energy & Fuels.* – 2021. – № 35(19). – P. 16212-16221.
20. Kumar D. An overview on activation of aluminium-water reaction for enhanced hydrogen production / D. Kumar, K. Muthukumar // *Jour. of Alloys and Comp.* – 2020. – T. 835. – P. 155-189.
21. Bayeshova A. Obtaining Hydrogen by Aluminium interaction with water / A. Bayeshova, A. Bayeshov, S. Molaigan // *Jour. of Chem. Tech. and Met.* – 2019. – № 3(54). – P. 639-642.
22. Rol' depolyarizatorov v processah vydeleniya vodoroda iz vody na poverhnosti amal'gamy alyuminiya / A. Bayeshov et al // *News of the of Sci. of the RK. JSC «D. V. Sokolsky institute of Fuel, catalysis fnd Electrochemistry», series Chemistry and Technology.* – 2023. – № 1(454). – P. 15-26. <https://doi.org/10.32014/2023.2518-1491.144>.

23. Gordeeva E.O. Effektivnost' formirovaniya poristyh oksidnyh plenok pri anodnom okislenii alyuminiya / E.O. Gordeeva, I.V. Roslyakov, A.I. Sadykov // Elektrokimiya. – 2018. – № 54(11). – P. 999-1009.
24. Takahashi H. Role of anodic oxide films in the corrosion of aluminum and its alloys / H. Takahashi, M. Chiba // Corr. Rev. – 2018. – № 36(1). – P. 35-54.
25. Anodnoe rastvorenie alyuminiya v rastvorah hloriga litiya I fiziko-himicheskie svoistva produktov ego rastvoreniya / L.R. Salemgaraeva i dr. // Vest. Tekhn. Univ. – 2018. – № 21(7). – P. 33-36.
26. Vliyanie anionov na elektrokhimicheskoe povedenie alyuminiya v rastvorah solei / I.O. Grigor'evna et al // Vest. Tekhn. Univ. – 2018. – № 21(7). – P. 46-50.
27. Grigor'yeva I.O. Vliyaniye khlorig-ionov na elektrokhimicheskoye rastvoreniye i anodnyuyu aktivatsiyu alyuminiya v vodnykh sredakh / I.O. Grigor'yeva, A.F. Dresvyannikov, L.R. Khayrullina // Vest. Tekhn. Univ. – 2014. – № 17(5). – P. 246-250.

А.К. Баешова*, С. Молайган¹, А.Б. Баешов¹, Р.М. Есетов¹, Б. Леска²

¹Центр физико-химических методов анализа,
Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект аль-Фараби, 71

²Университет имени Адам Мицкевича,
61–614, Польша, Познань, ул. Uniwersytetu Poznanskiego, 8

*e-mail: azhar_b@bk.ru

ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ НА РЕАКЦИЮ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА НА АЛЮМИНИЕВОЙ ПЛАСТИНЕ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ

Разработка альтернативных и эффективных способов получения водорода является актуальной научно-технической задачей. Перспективным подходом является получение водорода при взаимодействии алюминия с водой; однако протеканию реакции при обычных условиях препятствует наличие устойчивой оксидной плёнки на поверхности алюминия. Целью настоящей работы является активация поверхности алюминия путём введения хлорида натрия в водные растворы фосфорной или серной кислот и определение скорости выделения водорода. Экспериментальные исследования проводились с использованием фосфорной и серной кислот, хлорида натрия химической чистоты и алюминия марки А85. Получение водорода осуществлялось в лабораторных условиях на градуированной стеклянной установке бюреточного типа. Объём выделившегося водорода определяли по объёму вытесненной воды. Добавление хлорида натрия в кислые водные растворы приводило к разрушению оксидного слоя на поверхности алюминия и инициировало его взаимодействие с водой. Локальное растворение алюминия под действием хлорид-ионов вызывало формирование пористой и неоднородной поверхности, что существенно повышало скорость выделения водорода. В растворах фосфорной кислоты при концентрациях 1-7 моль·л⁻¹ скорость выделения водорода не превышала 8 мл·ч⁻¹·см⁻², однако при добавлении хлорида натрия (25 г·л⁻¹) возрастала до 50,02 мл·ч⁻¹·см⁻², увеличиваясь в 6,25 раза. В растворах серной кислоты (0,5-2,5 моль·л⁻¹) в присутствии хлорида натрия скорость выделения водорода возрастала от 25,27 до 108,38 мл·ч⁻¹·см⁻², что соответствует увеличению примерно в 5 раз. Таким образом, показана возможность получения водорода на алюминиевой поверхности при комнатной температуре из кислых водных растворов с добавлением хлорида натрия. Предложенный подход основан на использовании недорогих и доступных реагентов и может быть перспективным для автономных систем получения водорода, в том числе с использованием алюминиевого лома.

Ключевые слова: алюминий, водород, скорость выделения, фосфорная кислота, хлорид натрия, серная кислота

A.K. Bayeshova*, S. Molaigan¹, A. Bayeshov¹, R.M. Esetov¹, B. Leska²

¹Center of Physico-Chemical Methods of Research and Analysis,
Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 al-Farabi Avenue

²Adam Mickiewicz University,
61-614, Poland, Poznan, Uniwersytetu Poznanskiego, 8

*e-mail: azhar_b@bk.ru

THE INFLUENCE OF THE MEDIUM ON THE HYDROGEN EVOLUTION REACTION ON AN ALUMINIUM PLATE IN AQUEOUS SOLUTIONS

The development of alternative and efficient hydrogen production routes remains a critical scientific and technological challenge. One promising approach involves hydrogen generation from water through its interaction with aluminum; however, the presence of a stable oxide layer on the aluminum surface inhibits the reaction under ambient conditions. This study aims to activate the aluminum surface by introducing sodium chloride into aqueous solutions of phosphoric and sulfuric acids and to quantify the hydrogen evolution rate. Experiments were conducted using phosphoric and sulfuric acids, chemical-grade sodium chloride, and A85 aluminum. Hydrogen production was carried out under laboratory conditions using a calibrated glass burette-type setup. The volume of evolved hydrogen was determined by measuring the volume of water displaced from the burette. The addition of sodium chloride to acidic aqueous solutions resulted in the destruction of the aluminum oxide layer and initiated aluminum-water interaction. Localized dissolution induced by chloride ions led to the formation of a porous and heterogeneous surface, significantly enhancing hydrogen evolution. In phosphoric acid solutions ($1-7 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$), the hydrogen evolution rate remained low (up to $8 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$); however, upon addition of sodium chloride ($25 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), the rate increased to $50.02 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$, representing a 6.25-fold enhancement. In sulfuric acid solutions ($0.5-2.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) containing sodium chloride, the hydrogen evolution rate increased from 25.27 to $108.38 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$, corresponding to an approximately fivefold increase. Thus the results demonstrate the feasibility of hydrogen generation on aluminum surfaces at room temperature using acidic aqueous solutions supplemented with sodium chloride. The proposed activation approach relies on inexpensive and readily available reagents and shows potential for autonomous systems hydrogen production, including applications based on aluminum scrap.

Key words: aluminum, hydrogen, release rate, phosphoric acid, sodium chloride, sulfuric acid.

Авторлар туралы мәліметтер

Ажар Коспановна Баешова* – техника ғылымдарының докторы, профессор, Өл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, физика-химиялық зерттеу және талдау орталығы; e-mail: azhar_b@bk.ru.

Сержан Молайган – PhD-докторант, Өл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, физика-химиялық зерттеу және талдау орталығы; e-mail: molaiganserjan@gmail.com.

Абдуали Баешов – химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Өл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, физика-химиялық зерттеу және талдау орталығы; e-mail: bayeshov@mail.ru.

Расул Мұратбайұлы Есетов – химия және химиялық технология факультетінің 3 курс студенті, Өл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, физика-химиялық зерттеу және талдау орталығы; e-mail: rasulesetov17@gmail.com.

Богуслава Леска – профессор, ғылым докторы, ²Адам Мицкевич университеті; e-mail: boguslava.leska@amu.edu.pl.

Сведения об авторах

Ажар Коспановна Баешова* – Доктор технических наук, профессор, Центр физико-химических методов анализа, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби; e-mail: azhar_b@bk.ru.

Сержан Молайган – PhD-докторант, Центр физико-химических методов анализа, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби; e-mail: molaiganserjan@gmail.com.

Абдуали Баешов – Доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, Центр физико-химических методов анализа, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби; e-mail: bayeshov@mail.ru.

Расул Мұратбайұлы Есетов – студент факультета химии и химической технологии, Центр физико-химических методов анализа, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби; e-mail: rasulesetov17@gmail.com.

Богуслава Леска – профессор, доктор наук, Университет имени Адам Мицкевича; e-mail: boguslava.leska@amu.edu.pl.

Information about the authors

Azhar Bayeshova* – Doctor of Technical Science, Professor, Center of Physico-Chemical Methods of Research and Analysis, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: azhar_b@bk.ru.

Syerjan Molaigan – PhD-doctoral student, Center of Physico-Chemical Methods of Research and Analysis, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: molaiganserjan@gmail.com.

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

Rasul Muratbayuly Esetov – Student of the Faculty of Chemistry and Chemical Technology; e-mail: rasulesetov17@gmail.com.

Boguslawa Leska – Professor, dr.habilitation, Adam Mickiewicz University; e-mail: boguslava.leska@amu.edu.pl.

Редакцияға енуі 08.10.2025

Өңдеуден кейін түсуі 09.01.2026

Жариялауға қабылданды 02.02.2026