

Айзат Нагметоллақызы Айтуған – PhD, преподаватель кафедры химической физики и материаловедения, Казахский национальный университет имени аль-Фараби; e-mail: aizataitugan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3302-9363>.

Нуржан Нурлыбекович Нургалиев* – PhD, ассоциированный профессор кафедры химии и экологии, Шакарим Университет; исследователь Humboldt-Innovation GmbH, Университет имени Гумбольдта в Берлине; e-mail: nurgaliynurzhan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

Information about the authors

Nurgul Adyrbekkyzy Shadin – PhD, lecturer of the chemical department Abai Kazakh National Pedagogical University; researcher at institute of combustion problems; e-mail: nugen_87@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7713-1795>.

Yerbol Tileuberdi – PhD, associate professor of the chemical department of Abai Kazakh National Pedagogical University; leading researcher at institute of combustion problems; e-mail: er.tileuberdi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9733-5015>.

Zhazira Sagatbekovna Mukatayeva – PhD, associate professor, Head of the chemical department of Abai Kazakh National Pedagogical University; senior researcher at institute of combustion problems; e-mail: jazira-1974@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9733-5015>.

Aizat Nagmetollakzy Aitugan – PhD, lecturer of the department of chemical physics and materials science Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: aizataitugan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3302-9363>.

Nurzhan Nurlybekovich Nurgaliyev* – PhD, associate professor department of chemistry and ecology, Shakarim university; Researcher of Humboldt-Innovation GmbH, Humboldt University of Berlin; e-mail: nurgaliynurzhan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

Поступила в редакцию 31.07.2025

Поступила после доработки 04.08.2025

Принята к публикации 07.08.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-63](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-63)



FTAXP: 61.51.29

Ж.М. Мылтықбаева^{1*}, Д. Мұқталы¹, Е.И. Иманбаев², А. Абылайхан¹, Б.Х. Мусабаева³

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы, Әл-Фараби даңғылы, 71

²Жану проблемалары институты,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Бөгенбай батыр к-сі, 172

³Астана Халықаралық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қабанбай батыр даңғылы, 8

*e-mail: jannur81@mail.ru

ФОТОКАТАЛИТИКАЛЫҚ СУТЕГІ ТҮЗІЛУ ПРОЦЕСІНДЕГІ КАТАЛИЗАТОРЛАР ТҰРАҚТЫЛЫҒЫ

Аңдатпа: Бұл зерттеу жұмысы молибден (Mo) және вольфрам (W) элементтерін қамтитын катализаторлардың фотокаталитикалық сутек өндіру процесіндегі тиімділігі мен тұрақтылығын арттыруға бағытталған. Олардың құрылымдық, электрондық, оптикалық, каталитикалық қасиеттері зерттелген. Жасыл сутек өндірісіне арналған арзан әрі белсенді катализаторларды әзірлеу – қазіргі заманғы энергия мен экология саласындағы маңызды міндеттердің бірі. Зерттеу барысында MoS₂ және WO_x негізіндегі катализаторлар гидротермиялық әдіспен синтезделіп, өртүрлі температурада термиялық өңдеуден өткізілді. Катализаторлардың құрылымдық, морфологиялық және оптикалық қасиеттері Raman, UV-Vis сияқты заманауи әдістермен жан-жақты сипатталды. Сутек өндіру реакциялары арнайы жасалған күн симуляторы арқылы жүргізіліп, катализаторлардың фотокаталитикалық белсенділігі мен тұрақтылығы бағаланды. Нәтижелерге сәйкес, MoS-A320 үлгісі ең жоғары сутек түзілу белсенділігін (83 мл/сағ·г) және жоғары тұрақтылықты (93%) көрсетті. Бұл көрсеткіш платиналық катализаторлардың тиімділігіне жақын. Сонымен қатар, WO_x катализаторлары салыстырмалы түрде төмен белсенділік көрсетті. Зерттеу нәтижелері Mo және W құрамды катализаторлардың қасиеттеріне синтез параметрлері мен термиялық өңдеудің айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Бұл жұмыс жасыл энергетика мен

су электролизі жүйелері үшін тиімді, тұрақты және қолжетімді катализаторларды әзірлеу жолындағы маңызды қадам болып табылады. Бұл зерттеу Mo және W негізіндегі арзан, тиімді катализаторларды жобалауға жаңа мүмкіндіктер ұсынады.

Түйін сөздер: Оттекті MoS_2 , WO_x , эволюция реакциясы; сутек эволюциясы реакциясы; күкірттеу; гетерогенді катализ.

Кіріспе

Қазіргі таңда экологиялық жағдайдың нашарлауы және энергетикалық ресурстарға деген сұраныстың артуы жаңа, тиімді және экологиялық қауіпсіз технологияларды әзірлеуді қажет етеді. Сонымен қатар, жаһандық энергия сұранысының қарқынды өсуі жағдайында жасыл сутектің жаһандық энергия жүйесінде лайықты орнын алуы үлкен маңызға ие. Себебі сутек – көміртек шығаратын қазба отындарын алмастыра алатын ең үздік энергия тасымалдаушыларының бірі болып табылады. Дегенмен, жасыл сутек технологиясының қазіргі энергия жүйелерімен, әсіресе, шығындар мен қолжетімді инфрақұрылым тұрғысынан бәсекеге түсуі үшін зерттеулердің жылдам жалғасуы аса маңызды [1].

Жасыл сутек өндірудің танымал әдістерінің бірі – суды электролиз арқылы сутекке бөлу болып табылады. Су молекулаларын бөлу үшін қажетті энергияны альтернативті және жаңартылатын энергия жүйелерінен, әсіресе күн энергиясынан алу қажет. Жасыл сутек өндірісіндегі ең маңызды мәселе – сутек өндірісінде қолданылатын фотокаталитикалық және электрокаталитикалық процестердің төмен тиімділігі. Бұл мәселені шешудің басты жолы – төмен құны бар, мол, оңай өндірілетін, тұрақтылығы мен белсенділігі жоғары катализаторларды қолдану болып табылады [2, 3].

Осындай технологиялардың бірі ретінде жарықтың әсерінен жүретін фотокаталитикалық процестер кеңінен зерттелуде. Фотокатализ – қоршаған ортаға зиянсыз, энергияны аз қажет ететін және кең қолдану аясы бар перспективалы әдіс болып табылады. Бұл әдіс түрлі органикалық және бейорганикалық ластаушы заттарды залалсыздандыруға, сондай-ақ жаңартылатын энергия көздері арқылы сутек алу сияқты маңызды мәселелерді шешуге мүмкіндік береді.

Соңғы жылдары молибден дисульфиді (MoS_2) мен вольфрам дисульфиді (WS_2) сияқты ауыспалы металл дисульфидтері (TMDs) катализде қымбат бағалы металдардың баламалары ретінде қарастырылуда [4, 5]. MoS_2 және WS_2 негізінен жартылай өткізгіш тригональды (2H) фаза мен металлдық октаэдрлік (1T) фазаны қамтиды [6, 7]. Эксперименттік және теориялық зерттеулердің нәтижелері көрсеткендей, 1T металл фазасы 2H фазасымен салыстырғанда керемет өткізгіштікке және көптеген белсенді орталықтарға ие, бұл оны фотокаталитикалық жолмен сутегі (H_2) өндіруге тиімді сокатализатор етеді [8]. TMDs материалдарының ішіндегі ең танымалдарының бірі ретінде 1T-фазалы MoS_2 фотокатализ саласында кеңінен зерттелген [9-11]. Алайда 1T-фазалы WS_2 (1T-WS_2) көмегімен H_2 фотокаталитикалық өндіру туралы деректер әлі де сирек кездеседі.

MoS_2 – қабыршақ құрылымды, тыйым салынған зонасы тар, жартылай өткізгіш қасиетке ие материал ретінде фотокаталитикалық сутек өндіруде жоғары белсенділік көрсетеді. Ультразұқа MoS_2 наножапырағы – бұл соңғы жылдары үлкен назарға ие болған өткелдік металл сульфидтері жүйелеріне тән материал. Ол тамаша құрылымдық және фотокаталитикалық қасиеттерге ие болып, сутегі өндірудің жоғары белсенді реакцияларында платинаның орнын басатын материалға айналды [12,13].

Ал WO_x оксидтері – тотығу процестерінде, атап айтқанда органикалық ластаушы заттарды ыдырату мен ұшпа органикалық қосылыстарды жоюда тиімділігімен ерекшеленеді. Бұл материалдардың жарықты сіңіру қабілеті, химиялық және термиялық тұрақтылығы оларды фотокатализ саласында қолдануға мүмкіндік береді. Дегенмен, MoS_2 және WO_x материалдарының фотокаталитикалық белсенділігін салыстырмалы түрде зерттеу, олардың құрылымдық ерекшеліктері мен жұмыс істеу механизмдерін анықтау әлі де өзекті ғылыми мәселе болып отыр. Бұл бағыттағы зерттеулер жаңа композитті және гибриді катализаторларды әзірлеуге, сонымен қатар олардың тиімділігін арттыруға негіз бола алады. Осыған байланысты, MoS_2 және WO_x катализаторларының фотокаталитикалық процестердегі белсенділігін зерттеу – материалтану және экология саласындағы маңызды әрі өзекті ғылыми бағыттардың бірі болып табылады. Сондықтан, молибден мен вольфрам құрамды, жоғары каталитикалық белсенділікке және тұрақтылыққа ие катализаторларды зерттеу – сутегі энергетикасы мен тұрақты даму саласындағы перспективалы бағыт болып табылады.

Осы зерттеудің мақсаты – фотокаталитикалық сутегі өндіру реакциялары үшін тиімді Mo және W құрамды катализаторларды әзірлеу және зерттеу, синтез әдістері мен термиялық өңдеу температураларының олардың құрылымдық, электрондық және каталитикалық қасиеттеріне әсерін анықтау. Зерттеу сутегі энергетикасы мен су электролизі жүйелерінде қолдануға жарамды, жоғары белсенділікке және тұрақтылыққа ие құрылымдарды анықтауға бағытталған.

Эксперименттік бөлім

Катализаторларды дайындау

MoS₂/MoO₃ нанопластинкалары бір сатылы гидротермиялық синтез әдісі арқылы синтезделді [14]. MoO₃ (2.159 г) (молибден триоксид, ≥99.5%, Sigma-Aldrich) және деионизацияланған су (5.1 г) су ерітіндісі 30 минут бойы араластырылды, содан кейін тиоурей (7.98 г) (CH₄N₂S, ≥99%, Sigma-Aldrich) қосылып, тағы 15 минут араластырылды, нәтижесінде pH-ы 2.6 болған ерітінді алынды. Гель 180°C-де 24 сағат бойы тефлонмен қапталған автоклавқа орналастырылды. Содан кейін қатты зат суға жуылып, 80°C-де пеште түнгі уақытқа кептірілді. Соңында қатты заттар 240-320 °C аралығында азот атмосферасында 3 сағат бойы жылытылды. Үлгілер MoS-Ах деп аталды, мұндағы х – жылу өңдеу температурасы.

Салыстыру үшін дайындық процедурасындағы өзгерістер де қарастырылды. Осылайша, MoO₃ (4.313 г) және деионизацияланған су (10.0 г) ерітіндісі 30 минут араластырылды, содан кейін тиоурей (15.94 г) қосылып, тағы 15 минут араластырылды, нәтижесінде pH-ы 2.8 ерітінді алынды. Гель 180°C-де 24 сағат бойы автоклавқа орналастырылды. Қатты зат суға жуылып, 80°C-де пеште түнгі уақытта кептірілді. Соңында қатты зат 300 °C-де азот атмосферасында 3 сағат бойы жылытылды. Бұл үлгі MoS-AL300 деп аталды.

W-элементін қамтитын материалдар да А-сериясымен ұқсас синтез әдісі арқылы дайындалды. Осылайша, титан оксидінің су ерітіндісі (3.4467 г), тиоурей (8.0 г) және деионизацияланған су (5.0 г) дайындалып, 30 минут араластырылды, нәтижесінде pH-ы 3.7 болды. Алынған суспензия тефлонмен қапталған автоклавқа құйылып, 180°C-де 24 сағат қыздырылды. Қатты зат көп суға жуылып, 80°C-де пеште түнгі уақытта кептірілді. Соңында қатты зат 300 °C-де азот атмосферасында 3 сағат бойы жылытылды. Бұл үлгі WO-C300 деп аталды. Салыстыру үшін, гексагональді вольфрам брокені төмендегі дайындық әдісі бойынша дайындалды. Аммоний вольфраматы (0.706 г) ((NH₄)₆H₂W₁₂O₄₀·xH₂O, ≥99%, Alfa Aesar), тиоурей (0.768 г) және деионизацияланған су (30 г) ерітіндісі дайындалып, 30 минут араластырылды. Содан кейін оксал қышқылы (0.2025 г) (H₂C₂O₄, ≥98%, Merck) қосылып, тағы 20 минут араластырылды, нәтижесінде pH-ы 1.45 болды. Алынған суспензия тефлонмен қапталған автоклавқа құйылып, 200°C-де 24 сағат қыздырылды. Температурасы бөлме жағдайына дейін түсірілген соң, қара қатты зат алынып, деионизацияланған сумен жуылып, 60°C-де пеште түнгі уақытта кептірілді. Соңында үлгі 300 °C-де азот атмосферасында 3 сағат бойы жылытылды. Бұл үлгі WO-D300 деп аталды.

MoS@Nf (129-300; 129-240; немесе 129-320) (130-300) және WO@CB@Nf (145-300, 149-300) сия композиттерін дайындау

Электрод өнімділігіне сия құрамдастарының әсерін зерттеу үшін үш түрлі катализатор сиясы қолданылды. Бірінші протокол бойынша, суспензия келесі компоненттерді араластыру арқылы дайындалды: 5.0 мг MoS₂ немесе WOx, 3.0 мг көміртек қара (CB) (≥99.9%, Alfa Aesar), 45.0 мл дистилденген су және 135.0 мл этанол (≥99.8%, Merck). Дайын сияларды электродты модификациялау үшін суспензияларды біркелкі таралуға дейін бір сағат ультрадыбыстық өңдеуден өткізді. Көміртек мата (CC) электродтары микросерпентин арқылы дайын суспензиялармен қапталды. Қапталған электродтар қажетті катализатор жүктемесіне қол жеткізу үшін бөлме температурасында азот атмосферасында кептірілді. Салыстыру мақсатында MoS₂ немесе WOx катализатор ұнтағының орнына HER үшін Pt және OER үшін RuO₂ катализаторлары қолданылып, сия дайындау мен электродты қаптау протоколдары дәл солай жүргізілді.

Катализатор сипаттамасы

Катализаторлардың Раман спектрлері Olympus микроскопы бар Renishaw 1000 InVia спектроскопымен алынды. Жарық көзі ретінде 514.5 нм толқын ұзындығы бар 20 Вт Ar⁺ лазері қолданылды, спектр шешімі <4 см⁻¹, 10 рет сканерлеу жасап, жалпы жинау уақыты 100 секунд болды. Үлгілердің 200-800 нм диапазонындағы УФ-көрінетін спектрлері Varian Cary 5000

спектрометрінде жазылды. Өлшемдер Валенсия политехникалық университетінің (UPV) микроскопиялық қызметінде жүргізілді.

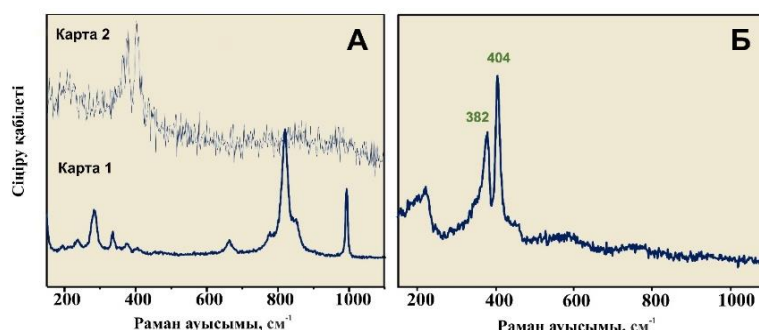
Нәтижелер мен талқылаулар

1-кестеде катализаторлардың кейбір физика-химиялық сипаттамалары көрсетілген.

Кесте 1 – Катализаторлардың физика-химиялық сипаттамалары

Катализаторлар	Дайындау әдісі	Термиялық өңдеу (°C)	Кристалды фазалар
MoS-A240	MoS-A	240	MoO ₃ > MoS ₂
MoS-A300	MoS-A	300	MoS ₂ > MoO ₃
MoS-A320	MoS-A	320	MoS ₂
MoS-AL300	MoS-AL	300	MoS ₂ > MoO ₃
WO-C300	WO-C	300	WO ₃ ·H ₂ O
WO-D300	WO-D	300	h-WO ₃

Mo құрамды катализаторларда Mo/S салмақ қатынасы шамамен 0,17 болатын MoS₂ фазасының түзілуі анықталды. Ал W құрамды үлгілерде күкірттің қосылуы байқалмайды, яғни S/W салмақ қатынасы шамамен 0 болып отыр. 1,2-суретте катализаторлардың Раман спектрлері көрсетілген.



Сурет 1 – Құрамында Mo бар катализаторлардың раман спектрлері

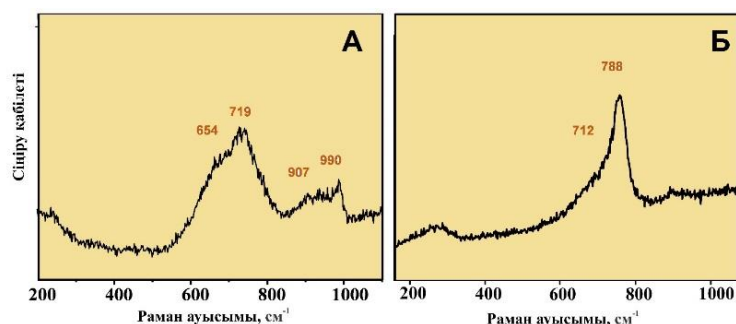
А) MoS-A300 (1-карта және 2-карта); Б) MoS-A320

MoS-A сериялы катализаторларда, 300°C температурада жылытылған катализатор әртүрлі спектрлерді көрсетеді 1-сурет, спектрлер А: карта 1 және карта 2. Осы жағдайда карта 1 спектрінде 382 және 404 см⁻¹-лік жолаулар бар, олар 2H-MoS₂-нің жазықтық ішіндегі E_{12g} және жазықтықтан тыс A_{1g} тербеліс режимдеріне сәйкес келеді [15-16], ал карта 2 спектрінде 156, 666, 820 және 995 см⁻¹-лік жолаулар бар, олар ортогональды MoO₃-ке сәйкес келеді [17] және 382 мен 404 см⁻¹-лік тағы бір жолақ MoS₂-ге байланысты. Алайда, 320°C-де жылытылған MoS-A320 үлгісінде (1Б-сурет) тек бір типті спектр анықталды, ол 382 және 404 см⁻¹ жолауларымен сипатталып, MoS₂ кристаллиттерінің негізгі болуын растайды. Осыған ұқсас қорытындыны mos-AL300 катализаторының нәтижелері түрінде ұсынуға болады. MoS₂-ге қатысты екі топқа да, MoO₃-ке қатысты жолақтарға да қатысты жолақтардың пайда болуымен.

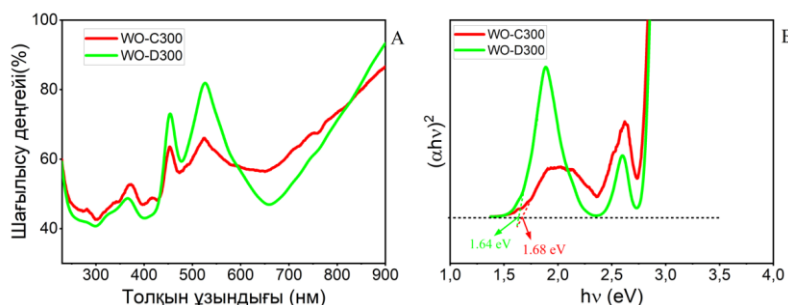
W құрамындағы катализаторларда мүлдем басқа көрініс байқалады (2-сурет). 345-420 см⁻¹ аймағында қос пиктің болмауы екі жағдайда да WS₂ кристаллиттерінің жоқтығын растайды [18]. Әрбір жағдайда қолданылған дайындық әдістерінің айырмашылығына байланысты бұл материалдарда үлкен айырмашылықтар байқалады. WO-C300 үлгісінің спектрінде 654, 719, 907 және 990 см⁻¹ жолаулары бар (2В-сурет, спектр А), бұл әртүрлі вольфрам оксидтеріне негізделген кристаллиттердің бар екенін көрсетеді. Осылайша, 692 және 798 см⁻¹ жолаулары көршілес оттегі атомдарына жатқызылған [u(O–W–O) WO₃·H₂O құрамында (мұнда шамамен пиктер)] [19], сонымен қатар пирохлор (NH₄)xWO₃ фазасына да тән [20]. W–O байланыстарына қатысты жолақтарда да айырмашылықтар бар: WO-C300 үлгісінде 991, 892 және 624 см⁻¹, бұл пирохлор (NH₄)xWO₃-ке қатысты болуы мүмкін, ал WO-D300 үлгісінде 860 және 805 см⁻¹, олар гексагональды h-(NH₄)WO₃-ке сәйкес келеді [21].

Сутектің фотокатализатикалық түзілуі

MoS₂ және WОх бөлшектерінің су ыдырату процестерінде фотокатализатор ретінде қолданылу мүмкіндігін арттыру үшін олардың оптикалық қасиеттері коллоидты дисперсияларының UV–Vis шағылыстыру спектрлерін қолдана отырып анықталды (3,4-сурет).



Сурет 2 – Құрамында W бар катализаторлардың раман спектрлері.
Үлгілер: А) WO-C300; Б) WO-D300



Сурет 3 – Ультракүлгін сәуледегі (А) WOx және (б) MoS₂ шағылысу коэффициенті.
Коллоидты дисперсияның Таус графиктері (в) WOx және (г) MoS₂ суда

3-суреттен көрініп тұрғандай, синтездеу әдістері WOx катализаторларының оптикалық жауаптарына әсер етеді, әрқайсысы ерекше, бірақ толығымен әртүрлі жарық сіңіру қасиетіне ие. Өзара салыстырғанда, WO-D300 үлгісінің ультракүлгін және көрінетін аймақтарда бірнеше қарқынды сіңіру шыңдары бар. Соңғы жолақ ұзақ толқындарда орналасып, оның саңылау энергиясы 1.64 эВ-ке тең. Бұдан басқа, WO-D300 үлгісінде шамамен 400 нм-де негізгі қарқынды жолақ бар, оның саңылау энергиясы 2.7 эВ-ге тең. WO-D300-мен салыстырғанда, MoS-AL300 және WO-C300 үлгілерінің саңылау энергиялары жарық сіңіру толқын ұзындығы қысқа жаққа ауысуына байланысты ұлғаяды. Бұл бөлшектердің ең кіші саңылау энергиялары тиісінше 1.68 және 1.92 эВ-де байқалады.

Таук әдісіндегі Кубелка–Мунк функциясы фотокатализаторлардың тыйым салынған аймағының енін анықтау үшін қолданылады.

$$(h\nu F(R\alpha))^{1/n} = A \times (h\nu - E_g),$$

мұндағы, $h\nu$ – фотон энергиясы (h – Планк тұрақтысы, ν – тербеліс жиілігі),

α – жұтылу коэффициенті,

E_g – тікелей тыйым салынған аймақтың ені,

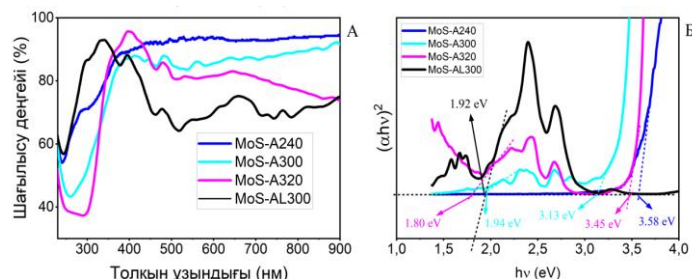
A – тұрақты шама,

$n = 1/2$,

R – шағылу қабілеті,

$F(R)$ – жұтылу коэффициентіне (α) пропорционал функция.

Құрылымдағы вольфрамды молибденмен алмастыру осы металл калькогенидтерінің оптикалық қасиеттеріне елеулі әсер етеді.



Сурет 4 – Ультракүлгін сәуледегі MoS₂ шағылысу коэффициенті. Коллоидты дисперсияның Таус графиктері MoS₂ суда

4-суреттен көрінетіндей, MoS_2 бөлшектерінің жарық сіңіру қасиеті қыздыру температурасына қатты тәуелді. MoS_2 -240 үлгісінде 242 нм толқын ұзындығында сіңіру белдеуі бар және ол жарық спектрінің тек 230-380 нм аралығын сіңіреді. MoS_2 -240-ның бұл жоғары энергиялы сіңіру шыңы MoS_2 -ның тікелей саңылау энергиясының экситондық сіңіру белдеулерінен туындайды. Қыздыру температурасы артқан сайын бөлшектердің жарық сіңіру аймағы ұзын толқындарға қарай жылжып, жарық спектрінің кеңірек бөлігін сіңіруі күшейеді. MoS_2 -320 бөлшектерінде ультракүлгін аймақтағы негізгі белдеуден басқа көрінетін аймақта қосымша сіңіру белдеулері байқалады. 4Б-суреттегі мәлімет бойынша, MoS_2 -240 бөлшегінің саңылау энергиясы 3.58 эВ болса, негізгі сіңіру шыңдарына сәйкес саңылау энергиялары MoS_2 -300 және MoS_2 -320 үлгілерінде тиісінше 3.45 және 3.13 эВ деп есептеледі. Сонымен қатар, MoS_2 -300 және MoS_2 -320 үлгілерінде 500-600 нм аралығында тағы басқа сіңіру белдеулері бар, олардың саңылау энергиялары тиісінше 1.94 және 1.80 эВ-ге тең. WOx және MoS_2 бөлшектерінің осы оптикалық жауаптары мен саңылау энергиясының өзгерістері ұқсас металл калькогенид құрылымдарымен үйлесімді. Әдебиеттерде MoS_2 құрылымдарының оптикалық қасиеттерінің құрылымдардың морфологиясы мен құрамына қатты байланысты екені кеңінен баяндалған. Мысалы, О. Суруцу және т.б. зерттеушілер MoS_2 -ның саңылау энергиясының 300 К-тен 10 К-ге дейінгі температураның төмендеуіне байланысты 1.66-дан 1.71 эВ-ге артқанын хабарлаған [22]. Басқа бір зерттеуде, З. Жлиди және әріптестері MoS_2 наноқабаттарының оптикалық саңылау энергиясын 2.21 эВ деп анықтап, бұл саңылау энергиясының наноқабаттарды қалыптастыру температурасына байланысты өзгеретінін көрсетті [23].

MoS_2 және WOx бөлшектерінің фотокаталитикалық белсенділігі осы бөлшектердің 0,35 моль/дм³ Na_2S және 0,25 моль/дм³ Na_2SO_3 суда еріген қоспасындағы коллоидтық дисперсияларын пайдаланып зерттелді. Бұл қоспа құрбандық электролиті ретінде қызмет етіп, фотокаталитикалық сутегі түзілу реакциялары (HER) барысында қолданылды (pH=13,0) және зерттеулер үй жағдайында жасалған фотокаталитикалық реакторда жүргізілді. Дисперсия 1000 Вт/м² (1 күн сәулесі) жарық күштілігімен күн симуляторымен жарықтандырылды, ал түзіліп жатқан сутегі газының мөлшері уақыт бойынша тіркелді. 2-кестеде сутектің түзілу көлемінің уақытқа тәуелділігі көрсетілген.

Кесте 2 – Сутектің түзілу көлемінің уақытқа тәуелділігі

Catalyst	Сутектің түзілу көлемі, мл/сағ·г					
	30 мин	60 мин	90 мин	120 мин	150 мин	180 мин
MoS-A240	5	10	18	25	28	31
MoS-A300	10,3	17	21	27	32	39
MoS-A320	20	41	52	60	75	83
MoS-AL300	6	8	11	19	23	30
WO-C300	13,8	19	28	33	38	41
WO-D300	0	0	0	1	2	2

Кесте мәліметтері бойынша, MoS_2 және WOx фотокатализаторларының сутегі түзілу жылдамдықтары елеулі түрде өзгереді. WO-D300 үлгісінде сутегі түзілу өте аз байқалады, ал MoS-AL300 үлгісі үшін сутегі түзілу жылдамдығы сағатына граммына 10,3 мл-ге, ал WO-C300 үшін 13,8 мл-ге дейін артады. Бұл көрсеткіштер сәйкесінше 0,42, 0,56 және 0,086 ммоль/сағ·г-ге тең. WS_2 бөлшектерінің фотокаталитикалық белсенділік реті мынадай: WO-C300 > MoS-AL300 > WO-D300. Фотокаталитикалық белсенділікке таспалық жарық жұту энергиясының (band gap) әсерін қарастырғанда, сутегі түзілу жылдамдығының реті тура таспалық жарық жұту энергиясының ретімен сәйкес келмейтіні анық байқалады. WO-D300 үлгісінің таспалық жарық жұту энергиясы ең төмен болғанымен, оның сутегі түзілу белсенділігі басқа үлгілерге қарағанда әлдеқайда төмен. Бұл нәтижелер таспалық жарық жұту энергиясынан бөлек, бөлшектердің құрамының, морфологиясының, кристалл құрылымының және бөлшек өлшемінің фотокаталитикалық белсенділікке әсер ететін маңызды факторлар екенін көрсетеді. Молибденнің құрылымдарға әсерін зерттеу мақсатында, MoS_2 бөлшектері де сутегі түзілу реакциясының фотокатализаторы ретінде сынақтан өткізілді. Кестеде көрсетілгендей, annealing (температурада өңдеу) температурасының өсуімен сутегі түзілу жылдамдығы да артады, ең жоғарғы көрсеткіш MoS-A320 үлгісінде – сағатына граммына 28,40 мл. Сәйкес

сутегі түзілу жылдамдықтары реті мынадай: MoS-A320 > MoS-A300 > MoS-A240, яғни сәйкесінше 0,71, 0,74 және 1,16 ммоль/сағ·г. Фотокатализаторлардың тұрақтылығын зерттеу үшін, әр фотокатализатордың көрсеткіштері қайта қалпына келтірілгеннен кейін бес рет сынақтан өткізілді. Нәтижелер барлық фотокатализаторлар бес рет қолданғаннан кейін бастапқы өнімділігінің 90%-нан астамын сақтап қалатынын көрсетеді. Ең жоғары тұрақтылық MoS-A320 бөлшектерінде байқалды – бес сынақтан кейін өнімділіктің 93%-ы сақталды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Осы жұмыста Mo және W құрамды фотокатализаторлар сәтті синтезделіп, олардың физика-химиялық, құрылымдық және оптикалық қасиеттері жүйелі түрде зерттелді. MoS₂ негізіндегі катализаторлар, әсіресе 320 °C температурада өңделген MoS-A320 үлгісі, сутегі өндіруде жоғары белсенділік көрсетіп, бұл материалдың болашағы зор екендігін дәлелдеді. Ал WOx құрылымдары арасында WO-C300 салыстырмалы түрде жоғары белсенділік көрсеткенімен, WO-D300 төмен нәтижелер көрсетті. MoS-A320 құрылымымен 1.16 ммоль сағ⁻¹ г⁻¹ сутек өндіру жылдамдығы жақсы тұрақтылықпен қамтамасыз етілсе, WS₂ құрылымдарымен ең көп дегенде 0.56 ммоль сағ⁻¹ г⁻¹ сутек эволюциясы байқалды. Бұл нәтижелер фотокатализаторлардың тиімділігіне тек таспалық саңылау энергиясы ғана емес, сонымен қатар құрылым, морфология және фазалық құрам сияқты факторлардың кешенді әсер ететінін көрсетеді. Жұмыстың нәтижелері экологиялық таза және жаңартылатын энергия көзі ретінде сутекті өндіруде арзан әрі тиімді катализаторларды жасау жолында маңызды ғылыми негіз болып табылады. Болашақта алынған мәліметтер MoS₂ және WOx негізіндегі гибриді немесе композициялық материалдарды жасауға бағытталған қосымша зерттеулерге негіз бола алады. Барлық катализаторлар қайта сынау кезінде тұрақты белсенділік сақтады, бұл олардың практикалық қолдануға жарамдылығын көрсетеді.

Әдебиеттер тізімі

1. Kayfeci M. Hydrogen production, Solar hydrogen production / M. Kayfeci, A. Keçebaş, M. Bayat // Elsevier. – 2019. – P. 45-83.
2. Kumar S.S. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production / S.S. Kumar, H. Lim // Energy reports. – 2022. – № 8. – P. 13793-13813.
3. Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies / B.S. Zainal et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2024. – № 189. – P. 113941.
4. Solvothermal synthesis of metallic 1T-WS₂: a supporting co-catalyst on carbon nitride nanosheets toward photocatalytic hydrogen evolution / J. Yi et al // Chem. Eng. J. – 2018. – № 335. – P. 282-289. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.125>.
5. One-step synthesis of MoS₂/WS₂ layered heterostructures and catalytic activity of defective transition metal dichalcogenide films / J.M. Woods et al // ACS Nano. – 2016. – № 10. – P. 2004-2009. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.5b06126>.
6. Supercritical CO₂-assisted reverse-micelle-induced solution-phase fabrication of two-dimensional metallic 1T-MoS₂ and 1T-WS₂ / X. Tong et al // ChemNanoMat. – 2017. – № 3. – P. 466-471. <https://doi.org/10.1002/cnma.201700011>.
7. Hydrothermal synthesis of stable metallic 1T phase WS₂ nanosheets for thermoelectric application / M. Piao et al // Nanotechnology. – 2017. – № 29. – P. 025705. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa9bfe>.
8. Stable metallic 1T-WS₂ nanoribbons intercalated with ammonia ions: the correlation between structure and electrical/optical properties / Q. Liu et al // Adv. Mater. – 2015. – № 27. – P. 4837-4844. <https://doi.org/10.1002/adma.201502134>.
9. Highly effective visible-light-induced H₂ generation by single-layer 1T-MoS₂ and a nanocomposite of few-layer 2H-MoS₂ with heavily nitrogenated graphene / U. Maitra et al // Angew. Chem. Int. Ed. – 2013. – № 52. – P. 13057-13061. <https://doi.org/10.1002/anie.201306918>.
10. Amorphous molybdenum sulfide as highly efficient electron-cocatalyst for enhanced photocatalytic H₂ evolution / H. Yu et al // Appl. Catal. B. – 2016. – № 193. – P. 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.04.028>.
11. Assembling metallic 1T-MoS₂ nanosheets with inorganic-ligand stabilized quantum dots for exceptional solar hydrogen evolution / X.B. Li et al // Chem. Commun. – 2017. – № 53. – P. 5606-5609. <https://doi.org/10.1039/C7CC02366A>.
12. Wafer-Scale Oxygen-Doped MoS₂ Monolayer / Z. Wei et al // Small Methods. – 2021. – № 5. – P. 2100091.

13. 1T-MoS₂ Coordinated Bimetal Atoms as Active Centers to Facilitate Hydrogen Generation / Q. Peng et al // Materials. – 2021. – № 14. – P. 4073.
14. Effect of O₂ Plasma Modification on the Electrocatalytic Hydrogen Evolution Reaction of MoS₂ / C. Zhang et al // J. Catal. – 2018. – № 361. – P. 384-392, <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2018.03.018>.
15. Boosting Hydrogen Evolution on MoS₂ via Co-Confining Selenium in Surface and Cobalt in Inner Layer / Z. Zheng et al // Nat. Commun. – 2020. – № 11. – P. 3315. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17199-0>.
16. Zamharir S.G. Laser-assisted tunable optical nonlinearity in liquid-phase exfoliated MoS₂ dispersion / S.G. Zamharir, R. Karimzadeh, S.H. Aboutalebi // Appl. Phys. A 124. – 2018. – P. 692.
17. In Situ Raman Spectroscopy of H₂ Gas Interaction with Layered M / J. Zhen Ou et al // J. Phys. Chem. – 2011. – C 115. – P. 10757-10763.
18. Optical signature of symmetry variations and spin-valley coupling in atomically thin tungsten dichalcogenides / H. Zeng et al // Sci Rep. – 2013. – № 3. – P. 1608.
19. Parthibavarman M. Role of Microwave on Structural, Morphological, Optical and Visible Light Photocatalytic Performance of WO₃ Nanostructures / M. Parthibavarman, M. Karthik, S. Prabhakaran // J Cluster Sci. – 2019. – № 30.– P. 495-506.
20. Synthesis and mixed conductivity of ammonium tungsten bronze with tunneling structures / L. Huo et al // Solid State Sci. – 2004. – № 6. – P. 679-688.
21. Photochromic hierarchical (NH₄)xWO₃ nanocrystals with bronze tunnel structure for energy-saving windows / X. Dong et al // Chem. Eng. J. – 2023. – № 477. – P. 147064.
22. Temperature-tuned band gap properties of MoS₂ thin films Materials Letters / O. Surucu et al. – V. 275. – 2020. – P. 128080.
23. Temperature effect on structural, morphological and optical properties of 2D-MoS₂ layers: An experimental and theoretical study. Zaineb Jlidi et al // Optik. V. 228. – 2021. – P. 166166.

Қаржыландыру

Жұмыс АР23486934 «Металл дисульфидтері мен мұнай порфириндерінің композиттерін қолдану арқылы сутегі алудың тиімді жаңа фотокаталитикалық жүйелерін жасау» жоба аясында орындалды.

Ж.М. Мылтықбаева^{1*}, Д. Мұқталы¹, Е.И. Иманбаев², А. Абылайхан¹, Б.Х. Мусабаева³

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, Алматы, пр. Аль-Фараби, 71

²Институт проблем горения,
Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172

³Международный университет Астана,
Республика Казахстан, г. Астана, проспект Кабанбай батыра, 8

*e-mail: jannur81@mail.ru

СТАБИЛЬНОСТЬ КАТАЛИЗАТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОГО ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА

Данное исследование направлено на повышение эффективности и стабильности катализаторов, содержащих молибден (Mo) и вольфрам (W), в процессе фотокаталитического получения водорода. Изучены их структурные, электронные, оптические и каталитические свойства. Разработка недорогих и активных катализаторов для производства «зеленого» водорода является одной из важнейших задач в области энергетики и экологии современности. В ходе работы катализаторы на основе MoS₂ и WO_x были синтезированы гидротермальным методом и подвергнуты термической обработке при различных температурах. Их структурные, морфологические и оптические характеристики были всесторонне исследованы с использованием современных методов, таких как спектроскопия Рамана и UV-Vis. Реакции получения водорода проводились с использованием специально созданного солнечного симулятора, по результатам которых была оценена фотокаталитическая активность и стабильность катализаторов. Наиболее высокую активность и стабильность показал образец MoS-A320, обеспечивший выход водорода 83 мл/ч·г и сохранивший 93% активности после пяти циклов. Эти показатели сопоставимы с эффективностью платиновых катализаторов. В то же время катализаторы на основе WO_x продемонстрировали сравнительно низкую активность. Результаты исследования показали, что параметры синтеза и условия термической обработки существенно влияют на

свойства катализаторов на основе Mo и W. Данная работа представляет собой важный шаг на пути разработки эффективных, стабильных и доступных катализаторов для систем «зеленой» энергетики и водного электролиза. Исследование открывает новые возможности для проектирования недорогих и эффективных катализаторов на основе Mo и W.

Ключевые слова: оксид MoS_2 , WS_2 , реакция эволюции водорода, сульфидизация, гетерогенный катализ.

Zh.K. Myltykbaeva^{1*}, D. Muktaly¹, Y.I. Imanbayev², A. Abylaikhan¹, B. Mussabayeva³

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

²Institute of Combustion Problems,
Republic of Kazakhstan, Almaty, 172 Bogenbay Batyr Street

³Astana International University,
Republic of Kazakhstan, Astana, Kabanbay Batyr Avenue, 8

*e-mail: jannur81@mail.ru

STABILITY OF CATALYSTS IN THE PROCESS OF PHOTOCATALYTIC HYDROGEN PRODUCTION

This study focuses on enhancing the efficiency and stability of catalysts containing molybdenum (Mo) and tungsten (W) in the process of photocatalytic hydrogen production. Their structural, electronic, optical, and catalytic properties were thoroughly investigated. The development of low-cost and active catalysts for green hydrogen production is one of the key challenges in modern energy and environmental science. In this work, MoS_2 - and WOx -based catalysts were synthesized via a hydrothermal method and subjected to thermal treatment at various temperatures. Their structural, morphological, and optical characteristics were comprehensively analyzed using advanced techniques such as Raman spectroscopy and UV-Vis. Hydrogen production reactions were carried out using a specially designed solar simulator, and the photocatalytic activity and stability of the catalysts were evaluated. The MoS_2 -A320 sample demonstrated the highest hydrogen evolution activity (83 mL/h·g) and maintained 93% of its initial performance after five cycles, which is comparable to that of platinum-based catalysts. In contrast, WOx -based catalysts showed relatively lower activity. The results revealed that synthesis parameters and thermal treatment conditions have a significant influence on the properties of Mo- and W-based catalysts. This study represents an important step toward the development of efficient, stable, and affordable catalysts for green energy systems and water electrolysis. The findings offer new opportunities for designing cost-effective and high-performance Mo- and W-based catalysts.

Key words: MoS_2 oxide, WS_2 , hydrogen evolution reaction, sulfidation, electrocatalyst, heterogeneous catalysis.

Авторлар туралы мәліметтер

Жаннұр Каденқызы Мылтықбаева – х.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Жаңа химиялық технологиялар мен материалдар ғылыми-зерттеу институты Қазба отындары мен оларды өңдеу өнімдерін зерттеу және кешенді талдау зертханасының меңгерушісі; e-mail: jannur81@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4336-3920>.

Динара Мұқталы – PhD, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Жаңа химиялық технологиялар мен материалдар ғылыми-зерттеу институты жетекші ғылыми қызметкері; e-mail: dinara.muktaly@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1139-5488>.

Ержан Иманбайұлы Иманбаев – PhD, қауымдастырылған профессор, Жану проблемалары институты жетекші ғылыми қызметкері; e-mail: erzhan.imanbayev@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8273-0020>.

Ақерке Абылайхан – х.ғ.к., Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Жаңа химиялық технологиялар мен материалдар ғылыми-зерттеу институты жетекші ғылыми қызметкері; e-mail: akerkeabylaikhan2@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1489-9603>.

Бинур Мусабаева – х.ғ.к., профессор, Астана Халықаралық университеті; e-mail: mussabayevabinur@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2209-1209>.

Сведения об авторах

Жаннұр Каденовна Мылтықбаева – к.х.н., Ассоциированный профессор, заведующей лабораторией исследования и комплексного анализа горючих ископаемых и продуктов их переработки научно-исследовательского института новых химических технологий и материалов КазНУ им. аль-Фараби; e-mail: jannur81@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4336-3920>.

Динара Мұқталы – PhD, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института новых химических технологий и материалов КазНУ им. аль-Фараби; e-mail: dinara.muktaly@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1139-5488>.

Ержан Иманбаевич Иманбаев – PhD, Ассоциированный профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем горения; e-mail: erzhan.imanbayev@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8273-0020>.

Акерке Абылайхан – к.х.н., ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института новых химических технологий и материалов КазНУ им. аль-Фараби; e-mail: akerkeabylaykhan2@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1489-9603>

Бинур Мусабаева – к.х.н., профессор, Международный университет Астана; e-mail: mussabayevabinur@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2209-1209>

Information about the authors

Zhannur Kadenovna Myltykbayeva – PhD, Associate Professor, Head of the Laboratory for Research and Comprehensive Analysis of Fossil Fuels and Products of Their Processing at the Scientific Research Institute for New Chemical Technologies and Materials at Al-Farabi KazNU; e-mail: jannur81@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4336-3920>.

Dinara Mukhtaly – PhD, Leading Researcher at Scientific Research Institute for New Chemical Technologies and Materials at Al-Farabi KazNU; e-mail: dinara.mukhtaly@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1139-5488>.

Yerzhan Imanbaiuly Imanbayev – PhD, Associate Professor, Leading Researcher at Institute of Combustion Problems; e-mail: erzhan.imanbayev@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8273-0020>.

Akerke Abylaykhan – PhD, Leading Researcher at Scientific Research Institute for New Chemical Technologies and Materials at Al-Farabi KazNU; e-mail: akerkeabylaykhan2@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1489-9603>.

Binur Mussabayeva – PhD, Professor, Astana International University; e-mail: mussabayevabinur@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2209-1209>.

Редакцияға енуі 14.08.2025
Өңдеуден кейін түсуі 18.08.2025
Жариялауға қабылданды 19.08.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-64](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-64)



FTAXP: 61.51.91

**С.К. Танирбергенова^{1,2}, А.Ж. Тагаева¹, Д.А. Тугелбаева^{2,*}, Н.К. Жылыбаева²,
З.А. Мансуров²**

¹Алматы технологиялық университеті,

050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Төле би көш, 100

²ҚР ҒЖБМ ҒК «Жану проблемалары институты» ШЖҚ РМК

050012, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Бөгенбай батыр көш, 172

*e-mail: dilya.12@mail.ru

МҰНАЙ ШЛАМДАРЫН ҚАЙТА ӨНДЕУ ПРОЦЕСІНЕ УЛЬТРАДЫБЫСТЫҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: Мұнай шламдары – мұнай өндіретін аймақтарда түзілетін зиянды қалдықтар. Мұнай шламының қалдықтарын өңдеу мұнай және мұнай-химия өнеркәсібі үшін өзекті мәселелердің бірі болыптабылады. Бұл мақалада мұнай шламдарын қайта өңдеу процесі кезінде жеңіл өнімдердің түзілуіне ультрадыбыстың әсері зерттелді.

Зерттеу барысында, мұнай шламынан сапасы жоғары өнімдерді бөліп алу әдістері зерттелді. Мұнай шламын өңдеу үшін еріткіштер таңдалды. Еріткіштердің әсерін анықтау үшін еріткіш қолданбай, ультрадыбыстық өңдеу жүргізілді. Өңделген мұнай шламын айдау процесі 65°C-250°C температура аралығында Сокслет аппаратында жүргізілді. Экстракция процесінің сапасына температура, уақыт және еріткіштің қатынасы сияқты әртүрлі параметрлердің әсері анықталды. Газды хроматография әдісін қолдана отырып, әр түрлі еріткіштермен ерітілген мұнай шламын айдау кезінде алынған жеңіл көмірсутектердің құрамы анықталды. Алынған нәтижелерге байланысты, еріткіш ретінде 1:1 қатынастағы гептан:бензол және гептан:толуол қоспалары таңдалды. Сонымен қатар, мұнай шламының компоненттік құрамын газохроматографиялық зерттеулердің нәтижелері және еріткіштердің салыстырмалы талдауы ұсынылды. Жеңіл