

Көміртекқұрамды қалдықтарды пиролиздік өңдеу арқылы техникалық көміртек алу

С.К. Танирбергенова*, Д.А. Түгелбаева, Н.К. Жылыбаева, А.Н. Айтуган,
К. Тажу, Г.М. Молдажанова, З.А. Мансуров

Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к., 172, Алматы, Қазақстан

МАҚАЛА ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

Алынған
14.10.2025

Түзетілген түрде алынды
31.10.2025

Қабылданды
07.11.2025

Түйін сөздер:

техникалық көміртек;
жанар-жағармай
материалдары;
пиролиз; қайта өңдеу;
көміртекқұрамды қалдықтар

АҢДАТПА

Бұл зерттеу жұмысы көміртекқұрамды қалдықтарды, атап айтқанда, мұнай қалдықтары мен пайдаланылған жанар-жағармай материалдарын пиролиз әдісі арқылы өңдеу нәтижесінде күл мөлшері төмен және меншікті беттік ауданы жоғары техникалық көміртек алу мүмкіндігін зерттеуге бағытталған. Мақалада пиролиз үдерісінің режимдері және алынған техникалық көміртектің сипаттамалары зерттелген. Алынған қатты қалдықтардың (техникалық көміртек) морфологиялық, элементтік және құрылымдық сипаттамалары заманауи физико-химиялық зерттеу әдістерімен талданды. Элементтік талдау нәтижелері бойынша ЖЖМҚ-нан алынған техникалық көміртек (ТК-1) құрамында көміртек мөлшері басым (78%), ал мұнай қалдықтарынан алынған үлгіде (ТК-2) бейорганикалық элементтер үлесі жоғары (Si, Al, Fe және т.б.) екендігі анықталды. SEM микрофотосуреттері ТК-1 үлгісінің борпылдақ, жоғары кеуекті құрылымға ие екенін, ал ТК-2 үлгісінің минералданған және ірі түйіршікті морфологиясымен ерекшеленетінін көрсетті. Рентгендік дифракциялық талдау (XRD) нәтижесінде екі үлгі де аморфты-графиттік құрылымға ие екені анықталды. BET әдісімен анықталған меншікті беттік ауданы ТК-1 үшін – 150 м²/г, ал ТК-2 үшін – 90 м²/г құрады. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, ЖЖМҚ негізінде алынған техникалық көміртек ТК-1 жоғары көміртек мөлшері мен дамыған беттік құрылымының арқасында адсорбенттер, катализаторлар және композиттік материалдар ретінде қолдануға тиімді екендігін көрсетті. Ал мұнай қалдықтарынан алынған ТК-2 үлгісі бейорганикалық қоспалардың көптігіне байланысты қосымша модификациялау және тазалау сатыларын қажет ететіні анықталды.

1. Кіріспе

Жедел қарқынмен жүріп жатқан индустрияландыру және әлем бойынша автокөлік санының үнемі артуы пайдаланылған жанар-жағармай материалдары қалдықтарының (ЖЖМҚ) көлемінің күрт өсуіне алып келді. Бұл қалдықтар құрамына түрлі мұнай өнімдері – отындар, майлар, майлағыштар және техникалық сұйықтықтар кіреді және оларды дұрыс пайдаланбау қоршаған ортамен адам денсаулығына айтарлықтай қауіп төндіреді. Пайдаланылған майлармен оларға ілеспе қалдықтар (майсүзгілері, ластанған шүберек, құм, ағаш үгінділері және тозған шиналар) қазіргі уақытта биосфераның ең зиянды жағандық ластанушыларының қатарына жатады [1].

Өнеркәсіптік қалдықтардың ауқымы мен жоғары уыттылығы оларды тиімді қайта өңдеу мен кәдеге жарату әдістерін шұғыл енгізудің өзектілігін айқындайды. Пайдаланылған ЖЖМҚ мәселесі тек сұйық фазамен шектелмейді – ол қатты ластағыштар мен қауіпті қосымша компоненттерді де қамтиды. Сондықтан мұндай қалдықтарды өңдеуге кешенді тәсіл, яғни майларды ғана емес, барлық қалдық түрлерін басқаруды қамтитын жүйелі көзқарас қажет. Қалдықтардың әртекті құрамы қайта өңдеу процестерінің тиімділігі мен экономикалық негіздемесіне тікелей әсер етеді, бұл өз кезегінде алдын ала сұрыптау немесе әртекті шикізатпен жұмыс істей алатын технологиялардың болуын талап етеді. Осыған байланысты химиялық түрлендірумен қатар қалдықтарды

*Corresponding author: N.K. Zhylybayeva; E-mail address: nurzhamaljk@mail.ru

жинау, сақтау және тасымалдау сияқты логистикалық кезеңдердің де дұрыс ұйымдастырылуы маңызды. Бұл сатылардағы қателіктер қалдықтарды кәдеге жарату нысандарына жеткізу барысында екінші реттік экологиялық ластануға себеп болуы мүмкін.

Пайдаланылған ЖЖМҚ тиімді басқару қоршаған ортаға теріс әсерді азайтып қана қоймай, құнды өнім – техникалық көміртек алуға мүмкіндік береді. Мұндай тәсіл тұйық (циркулярлы) экономика қағидаттарына сай келіп, қалдықтарды қайта өңдеудің өміршең әдісі болып табылады (1-сурет).



Сурет 1. Жанар-жағармай қалдықтарын пиролиз арқылы қайта өңдеу.

Техникалық көміртек – бірегей қасиеттерімен ерекшеленетін және көптеген салаларда кеңінен қолданылатын аса маңызды өнеркәсіптік материал. Оған деген жоғары сұраныс тұрақты және баламалы өндіру технологияларын әзірлеуге күшті экономикалық ынталандыру туғызады [2].

Қазіргі таңда техникалық көміртек негізінен резеңке мен пластмасса өндірісінде беріктендіргіш компонент ретінде қолданылады. Өндірілетін техникалық көміртектің шамамен 70%-ы шиналар өндірісінде, ал 20%-ға жуығы резеңке-техникалық бұйымдарда пайдаланылады [3].

Бүгінгі күні әлемдік нарықта бөлшек морфологиясы, құрылымдық белсенділігі және физика-химиялық сипаттамалары бойынша ерекшеленетін көптеген маркалар бар, бұл олардың нақты қолдану саласын анықтайды. Техникалық көміртектің негізгі өндірушілері – Ресей, Қытай, АҚШ және басқа да индустриялық дамыған мемлекеттер, мұнда жалпы және арнайы мақсаттағы толтырғыштар өндіретін ірі кәсіпорындар шоғырланған.

Техникалық көміртек енгізілетін полимерлі композициялардың қасиеттеріне кешенді әсер етеді. Оның маркасы мен мөлшеріне қарай материалдардың тозуға төзімділігі, қаттылығы, беріктігі, жылулық тұрақтылығы, сондай-ақ электрөткізгіштік және антистатикалық қасиеттері өзгереді.

Әртүрлі маркалардың қолданылу әмбебаптығы олардың морфологиялық сипаттамаларына (бөлшек өлшемі, меншікті бет ауданы) тәуелді, бұл өз кезегінде соңғы материалдың механикалық қасиеттерін мақсатты түрде реттеуге мүмкіндік береді [4]. Мысалы, N120 маркасы ең жоғары беріктік пен тозуға төзімділігімен ерекшеленіп, ауыр жүк көліктерінің және өте қатал жағдайларда қолданылатын жоғары өнімділіктегі шиналардың протекторларына арналған. N330 маркасы беріктік, тозуға төзімділік және өңдеу жеңілдігі арасындағы әмбебап теңгерімділік береді, сондықтан ол көптеген жеңіл көлік шиналарының протекторлық қабаттары мен жалпы мақсаттағы резеңкелер өндірісінде тиімді [5]. Ал N660 маркасы бөлшек өлшемі үлкенірек және иілгіштікті қажет ететін бұйымдар (шиналардың қаңқалық және бүйірлік қабырғалары, шлангілер, резеңке төсемдер) үшін оңтайлы. N990 төмен белсенді көміртегі өз инерттілігі мен ең үлкен бөлшек өлшемінің арқасында беріктендіру әсері аз, бірақ ауа өткізбеу (газ өткізбеу) қасиеті маңызды ішкі камераларға және басқа да резеңкелер мен пластмассаларға арзан толтырғыш ретінде қолданылады [6, 7].

Осылайша, техникалық көміртек резеңке-техникалық, кабельдік, пластмасса және лак-бояу өнеркәсібінде кеңінен қолданылатын негізгі функционалдық компонент болып табылады. Оның құрылымы мен қасиеттерін терең түсіну композициялық материалдардың қажетті эксплуатациялық сипаттамалары бар жаңа түрлерін жасауға мүмкіндік береді.

Техникалық көміртекке жоғары сұраныс пен оның кең қолданылу аясы бұл материалды тұрақты әдістермен өндіруді өзекті етеді, ал пайдаланылған ЖЖМҚ – мұндай өндіріс үшін әлеуетті құнды шикізат көзі болып табылады.

Пайдаланылған ЖЖМҚ құрамына жанармайдың (бензин, дизель, керосин, газ) және майлағыш заттардың (қозғалтқыш және трансмиссиялық майлар, пластикалық майлар, арнайы сұйықтықтар – тежеу және салқындатқыш жүйелерге арналған) көптеген түрлері кіреді. Мұнайдың негізгі элементі – көміртек (83-87%), одан кейін сутек (12-14%), олар негізінен көмірсутектер түрінде кездеседі [8].

Пайдаланылған майлардың құрамында гетероатомдар (оттек, азот, күкірт), металдар және басқа қоспалар түрінде айтарлықтай мөлшерде ластағыштар болады. Кейбір майларда күкірттің мөлшері 0,5%-ға дейін жетуі мүмкін [9]. Күкірттің болуы соңғы өнімнің (техникалық көміртектің) сапасына және қоршаған ортаға (күкірт оксидтерінің бөлінуі) теріс әсер етеді. Бұдан басқа, шикі мұнай құрамында ванадий, никель, темір, мырыш, хром және марганец сияқты 30-дан астам металл кездеседі [10], олар каталитикалық у немесе күл түрінде қалып, көміртек тазалығын төмендетуі мүмкін.

Майлардағы шайырлар мен асфальтендер мұнайдың ыдырау өнімдері ретінде кездесіп, құрамында көміртек (88%-ға дейін), сутек (10%-ға дейін) және гетероатомдар (14%-ға дейін) болады. Мұнайлар осы компоненттердің массалық үлесіне қарай азшайырлы, шайырлы және жоғары шайырлы болып жіктеледі [11].

ЖЖМҚ құрамындағы гетероатомдар, металдар, су және асфальтендер сияқты әртүрлі қоспалардың болуы техникалық көміртек өндірісінде елеулі қиындықтар тудырады. Бұл қоспалар өнім сапасын төмендетіп (жоғары күл мен күкірт мөлшері), технологиялық жабдықтың коррозиясына және қоршаған ортаға зиянды шығарындылардың түзілуіне себеп болуы мүмкін [12, 13]. Сонымен қатар, судың болуы қосымша энергия шығынын талап етіп, пиролиз реакцияларының тиімділігін төмендетеді [14, 15]. Сондықтан тұрақты әрі сапалы шикізатты қамтамасыз ету үшін алдын ала тазалау және дайындау кезеңі қажет.

Көптеген жоғары температуралы процестерде көміртекқұрамды қалдықтар айтарлықтай алдын ала өңдеусіз тікелей қолданылады, бұл жалпы технологияның күрделілігі мен өзіндік құнын арттырады. Осыған байланысты көміртекқұрамды қалдықтарды кешенді өңдеу арқылы күл мөлшері төмен және меншікті беттік ауданы дамыған техникалық көміртек алу тәсілін әзірлеу өзекті болып табылады.

Зерттеудің негізгі мақсаты – мұнай қалдықтары мен пайдаланылған жанар-жағар май материалдары қалдықтарынан пиролиз әдісі арқылы техникалық көміртек алу технологияларының қазіргі жағдайына талдау жасау және олардың тиімділігін арттыру үшін оңтайлы өңдеу шарттарын анықтау. Аталған жұмыстың негізгі міндеті мұнай қалдықтары мен ЖЖМҚ-дан алынған техникалық көміртектің физико-химиялық және морфологиялық қасиеттерін кешенді түрде зерттеу және олардың сапасын салыстырмалы талдау арқылы бағалау болып табылады.

2. Эксперименттік бөлім

2.1. Зерттеу нысандары

Зерттеу нысаны ретінде екі түрлі көміртек құрамды қалдықтар пайдаланылды: (i) пайдалану мерзімі өткен пайдаланылған ЖЖМҚ; (ii) мұнайды тасымалдау және өңдеу кезінде түзілетін мұнай шламдары (2-сурет).



1) жанар жағармай қалдығы



2) мұнай қалдығы

Сурет 2. Зерттеу нысандары.

Пайдаланылған ЖЖМҚ – іштен жану қозғалтқыштары мен басқа да техникалық жүйелерде майлау, салқындату және бөлшектерді қорғау қызметін атқаратын материалдардың ұзақ уақыт қолданылуы нәтижесінде түзілетін күрделі көпкомпонентті жүйе. Оның құрамына негізінен көмірсутекті қосылыстар (70-80%), сондай-ақ функционалдық қоспалар (5-10%), тотығу өнімдері (5-8%), су және механикалық қоспалар (1-3%) кіреді. Органикалық бөлігінде алкандардың үлесі 40-50%, циклоалкандардың үлесі 20-30%, ал ароматты көмірсутектердің үлесі 15-25% аралығында болады. Функционалдық қоспалар құрамында антиоксиданттар, ингибиторлар мен тозуға қарсы қоспалар болады, олар жанар-жағармайдың тұрақтылығын және қорғаныш қасиеттерін қамта-

массыз етеді. Термиялық тотығу өнімдері органикалық қышқылдар мен шайырлы қосылыстар түрінде кездесіп, майдың тұтқырлығының артуына әсер етеді. Сонымен қатар, қалдық құрамында аз мөлшерде су мен механикалық қоспалар болады, олар металл тозуы мен сыртқы ластану нәтижесінде пайда болады. Жалпы алғанда, ЖЖМҚ құрамында көмірсутектер басым, алайда тотығу өнімдері мен ауыр металл қосындылары оның экологиялық қауіптілігін арттырады. Соған қарамастан, мұндай қалдықтар регенерация немесе қайта өңдеу әдістері арқылы энергетикалық және технологиялық мақсаттарда тиімді пайдаланылуға мүмкіндік береді.

Мұнай қалдықтары (мұнай шламы) – ауыр көмірсутектерден, минералдық қосындылардан, металдардан және қатты бөлшектерден (топырақ, құм) тұратын тұтқыр немесе паста тәрізді массалар. Мұнай шламының органикалық бөлігі шамамен 20-30% аралығын құрайды және негізінен көмірсутектердің қоспасынан тұрады. Органикалық бөлігінде парафинді-нафтенді және ароматты көмірсутектер (шамамен 72-75%), сондай-ақ шайырлар (шамамен 18-22%) мен асфальтендер (шамамен 4-6%) кездеседі. Бұл компоненттер шламның энергетикалық құндылығын арттырып, пиролиз немесе рекуперация әдістері арқылы пайдалы өнімдер (отын, көміртек материалдары) алуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар мұнай шламының 35-45% су фазасы құрайды. Оның құрамында минералды тұздар (хлоридтер мен сульфаттар) мен технологиялық реагенттердің қалдықтары болады. Қатты фаза немесе минералды-механикалық бөлік шамамен 30-40% құрайды. Бұл бөлік құмнан, саздан, металл тоттарынан және оксидтерден (Fe, Si, Al, Ca) тұрады. Экологиялық тұрғыдан қауіпті болғанымен, мұндай қалдықтар термохимиялық қайта өңдеуге жарамды көміртек шикізаты ретінде үлкен әлеуетке ие.

2.2. Шикізатты дайындау және пиролиз үрдісі

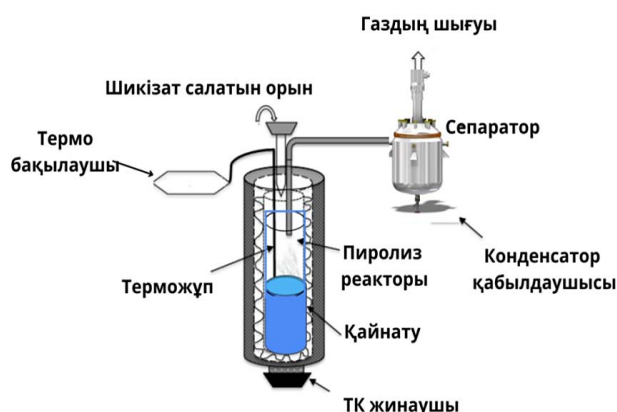
Пиролизге дейін қалдықтар алдын ала дайындықтан өтті: механикалық сүзгілеу арқылы қатты бөлшектерден тазартылды, содан кейін 100-160 °C температурада тұрақты массаға дейін кептірілді. Бұл қадам ылғал мен бейкөміртекті қоспалардың пиролиз процесіне әсерін азайтуға мүмкіндік берді.

Алдын-ала дайындалған шикізатты термиялық өңдеу 550 °C температурада, ауа қатысынсыз жүргізілетін анаэробты пиролиз әдісімен жүзеге

асырылды. Ол үшін арнайы жасалған тік реактор қолданылды (3-сурет). Реактор біркелкі қыздыруды, герметиканы және ұшқыш өнімдерді бақыланатын түрде әкетуді қамтамасыз етеді.

Реактордың негізгі тораптары мыналар: шикізатты енгізуге арналған жүктеу бункері; бастапқы пиролиз аймағы (400-600 °C) – мұнда көмірсутектердің термиялық деструкциясы жүреді; ұшқыш компоненттерді толық жандыру камерасы; сұйық фракцияларды бөліп алу үшін конденсациялық жүйе; газ шығару желісі – алынған газды энергетикалық мақсатта пайдалану үшін; төменгі люк – түзілген қатты қалдық (техникалық көміртек) шығарылады [16].

Пиролиз температурасы 550 °C-қа жеткеннен кейін процесс 1 сағ. бойы ұсталды, содан кейін реактор табиғи жолмен салқындатылды. Алынған қатты қалдық – техникалық көміртек жиналып, ұсақталып, физико-химиялық талдауға жіберілді.



Сурет 3. Техникалық көміртекті өндіруге арналған пиролиз реакторының сызбасы.

2.3. Талдау әдістері

Алынған техникалық көміртектің морфологиялық және элементтік құрамы Thermo Fisher Scientific (АҚШ) фирмасының Phenom ProX үлгісіндегі сканерлеуші электрондық микроскоп (SEM) көмегі арқылы зерттелді. Аспап энергия-дисперсиялық рентгендік детектормен (EDX) жабдықталған. Үлгілер ток өткізгіш субстратқа бекітіліп, өткізгіш қабатпен қапталды.

Азоттың адсорбция-десорбция изотермалары (BET) BSD-660S A3 физикалық адсорбция анализаторы (BSD INSTRUMENT, Бейжің, Қытай) арқылы 77,3 K температурасында жоғары таза-лықтағы азотты адсорбент ретінде қолдана отырып алынған.

Рентгендік дифракция (XRD): Рентгендік дифракциялық үлгілер DW-XRD-27MINI дифрактометрінде $\text{CuK}\alpha$ сәулеленуін ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) қолданып, Bragg-Brentano (θ - 2θ) геометриясында алынған. Рентген түтігінің тоғы мен кернеуі тиісінше 30 мА және 40 кВ деп орнатылды. Үлгілер ұнтақталып, ұстағыштарға пресс арқылы орналастырылып, 60 айн/мин жылдамдықпен үздіксіз айналымда өлшенді.

3. Нәтижелер мен оларды талқылау

Жанар-жағармай материалдар қалдықтарынан алынған техникалық көміртек (ТК-1) ірі түйіршікті, біркелкі емес құрылымымен және әртүрлі өлшемдегі бөлшектердің болуымен сипатталады. Материалдың консистенциясы борпылдақ, бұл оның құрамында минералдық қоспалардың және біртекті емес көміртек фазасының қалдықтарының бар екенін көрсетеді. Түсі – қою

сұр, кей жерлерінде ашық немесе жылтыр түсті түйірлер байқалады. 4-суретте жанар-жағармай материалдары қалдықтарынан және мұнай қалдықтарынан алынған екі түрлі техникалық көмір-тектің сыртқы көрінісі берілген.

Мұнай қалдықтарынан алынған техникалық көміртек (ТК-2) керісінше, майда түйіршікті әрі біртекті құрылымға ие. Оның түсі мен текстурасы біркелкі, ұнтақ түрінде және жақсы ағымдылық қасиетке ие. Бұл көрсеткіштер бастапқы шикізаттың тазалық деңгейі мен алынған көміртек-тің сапасының жоғары екенін дәлелдейді. Түсі – қою қара, беткі қабаты күңгірт сипатта.

Жалпы алғанда, мұнай қалдықтарынан алынған техникалық көміртек визуалды түрде біркелкі әрі құрылымдық тұрғыда тұрақты болып табылады, бұл жанар-жағармай қалдықтарынан алынған өніммен салыстырғанда оның сапалық сипаттарының жоғары екенін көрсетеді.



ТК-1



ТК-2

Сурет 4. Жанар-жағармай материалдары қалдықтары (ТК-1) мен мұнай қалдықтарынан (ТК-2) алынған техникалық көміртек фотосуреттері.

Жанар-жағармай материалдары қалдықтары мен мұнай қалдықтарынан алынған техникалық көміртектің элементтік құрамы зерттелді. Элементтік талдау нәтижелері 1-кестеде және 5-суретте келтірілген.

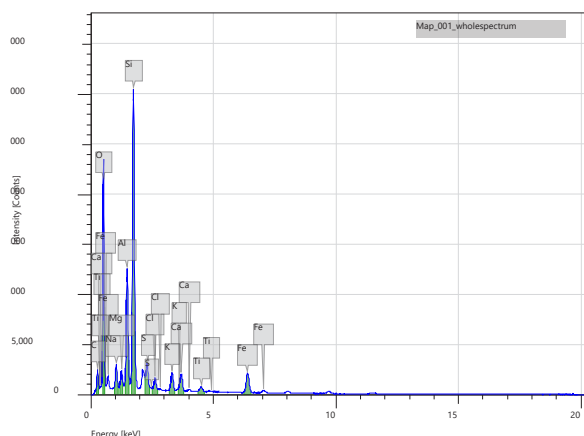
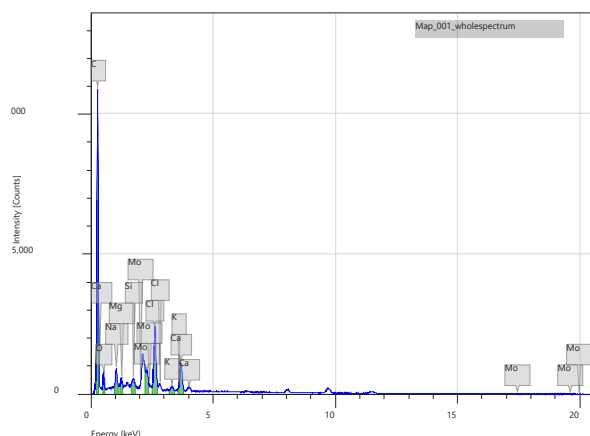
Техникалық көміртек ТК-1 құрамында негізгі элемент ретінде көміртек (С) басым, оның массалық үлесі 78,00% құрайды. Бұл көрсеткіш мұнай

өнімдеріне тән жоғары органикалық құрамның сақталғанын дәлелдейді. Келесі маңызды элемент – оттегі (О), оның мөлшері 8,76%. Сонымен қатар, үлгі құрамында натрий (Na – 1,52%), магний (Mg – 0,59%), кремний (Si – 0,29%), хлор (Cl – 4,60%), калий (K – 0,39%), кальций (Ca – 2,86%) және молибден (Mo – 0,53%) элементтері анықталды.

Кесте 1. Техникалық көміртектің элементтік құрамы

Үлгі	Элементтер, %												
	C	O	Na	Mg	Si	Cl	K	Ca	Mo	Al	S	Fe	Ti
ТК-1	78,00	8,76	1,52	0,59	0,29	4,60	0,39	2,86	0,53	-	-	-	-
ТК-2	17,00	41,29	2,34	1,28	16,81	1,29	2,07	2,10	-	7,61	2,03	5,50	0,68

Ескерту: Барлық өлшенген элементтердің аналитикалық қателіктері стандарттық шектерде ($\pm 0,1$ - $0,5$ салмақтық %) орналасқан.



Сурет 5. Жанар-жағармай материалдары қалдықтары мен мұнай қалдықтарынан алынған техникалық көміртектің элементтік құрамдары.

Мұнай қалдықтары негізінде алынған техникалық көміртек ТК-2 құрамында көміртек мөлшері едәуір төмен (17,00%), ал оттегі (41,29%) және кремний (16,81%) үлесі жоғары екені байқалады. Бұл материалдың бейорганикалық компоненттерге бай құрылымын және бастапқы шикізаттағы минералдық фазалардың әсерін көрсетеді. Оттектің жоғары үлесі бастапқы шикізаттағы тотығу өнімдерінің және метал оксидтерінің (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2) болуы нәтижесінде қалыптасады. Бастапқы шикізаттағы немесе пиролиз кезінде түзілген оттегі көміртек торындағы функционалды топтар ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $\text{C}=\text{O}$) арқылы бейорганикалық компоненттерге бай құрылым түзуге мүмкіндік береді. Кремнийдің айтарлықтай мөлшері мұнай шламында кездесетін кварцты бөлшектер мен топырақ тектес минералдық фазалардың болуын көрсетеді. Сонымен қатар, алюминий (Al – 7,61%), темір (Fe – 5,50%) және күкірт (S – 2,03%) элементтерінің болуы үлгінің минералданған табиғатын дәлелдейді [17].

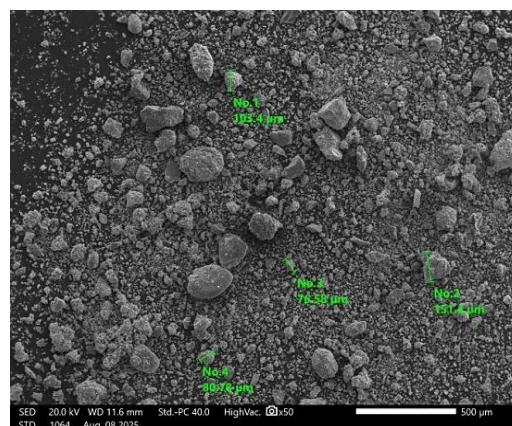
Элементтік құрамдағы айырмашылық екі түрлі шикізат көзінің табиғаты мен химиялық құрамына тәуелді. ТК-1 үлгісінде органикалық компоненттердің басым болуы оның потенциалды адсорбциялық және композиттік материал ретінде қолданылу мүмкіндігін арттырады, ал ТК-2 жоғары бейорганикалық құрамымен ерекшеленеді, бұл оны катализдік немесе құрылымдық мақсаттарда пайдалануға негіз бола алады.

Салыстырмалы талдау екі үлгінің элементтік құрамында айтарлықтай айырмашылықтардың бар екенін көрсетеді. ЖЖМҚ-нан алынған техникалық көміртек жоғары мөлшердегі көміртек концентрациясымен сипатталады, бұл аз минералдық қоспалары бар мұнай өнімдеріне тән қасиет болып табылады. Ал мұнай қалдықтарынан

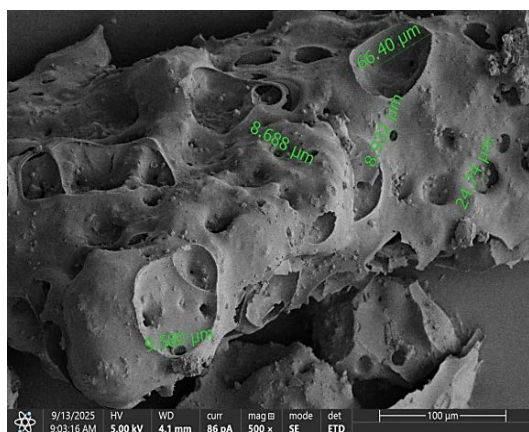
алынған техникалық көміртек құрамында оттегі, кремний және алюминий элементтерінің едәуір жоғары үлесімен ерекшеленеді, бұл оның айқын минералдық табиғатын көрсетеді. Мұндай айырмашылықтар мұнай шламдарының шығу тегімен, олардың қалыптасу және сақталу жағдайларымен, сондай-ақ деградациялану дәрежесі мен ылғалдылық деңгейімен түсіндіріледі.

550 °C температурада синтезделген техникалық көміртектегі SEM микрофотосуреттері ЖЖМҚ қоспасынан және мұнай қалдықтарынан алынған үлгілер үшін тиісінше 6 және 7-суреттерде көрсетілген.

6-суреттен көрініп тұрғандай, бөлшектер борпылдақ және кеуекті құрылымымен сипатталады, олардың бетінде айқын ішкі қуыстар (шамамен 10-45 мкм) мен біркелкі емес жиектер байқалады. Бұл құбылыс пиролиз процесі кезінде газдың қарқынды бөлінуімен (шамамен 0,5-1,2 л/г) байланысты, ол органикалық қосылыстардың деградациясына тән белгі болып табылады. Бөлшек-



Сурет 6. Өңделген жанар-жағармай материалдарының қалдықтарынан синтезделген техникалық көміртек ТК-1 SEM микрофотосуреті.



Сурет 7. Мұнай қалдықтарынан синтезделген техникалық көміртек ТК-2 SEM микрофотосуреті.

тердің өлшемдері 76,58-151,4 мкм аралығында өзгеріп, өнімнің гранулометриялық құрамы бойынша гетерогенді екенін көрсетеді.

Мұндай морфология жоғары температуралық (550 °C) әсер ету және жылдам салқындату (10^2 - 10^3 °C/c) жағдайында алынған техникалық көміртекке тән, бұл оның кеуектілігі мен меншікті беттік ауданының жоғары дамуын қамтамасыз етеді [18]. Бөлшектердің құрылымы мен өлшемдері бастапқы шикізаттың пиролиздік өңдеуден өткенін, яғни органикалық компоненттердің ыдырауы нәтижесінде көміртекті қалдықтың түзілгенін көрсетеді. Жоғары кеуектілік техникалық көміртекті сорбент, толтырғыш немесе катализатор ретінде пайдалануға тиімді етеді. Үлгінің бетінде әртүрлі пішінді және өлшемді кеуекті құрылымдар анық байқалады.

7-суретте мұнай қалдықтарынан синтезделген техникалық көміртек ТК-2 үлгісінің бетінде әртүрлі пішінді және өлшемді кеуекті құрылымдар анық байқалады. Бөлшектердің беті кедір-бұдырлы, агрегация дәрежесі жоғары. Кеуектердің мөлшері 8,7-66,4 мкм аралығында өзгеріп, бұл

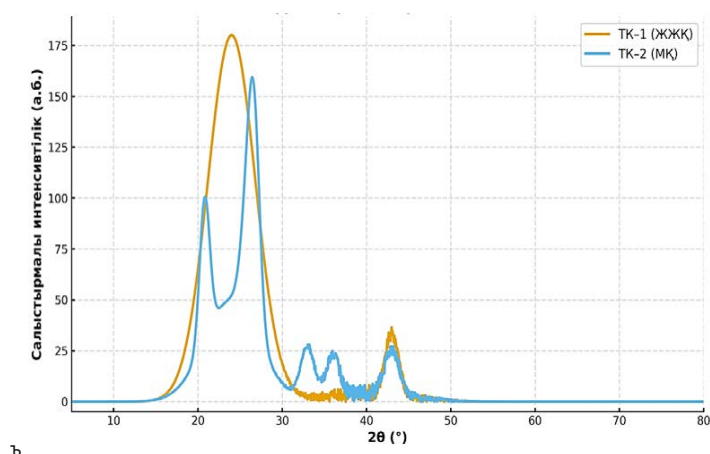
көміртекті материалдардың термиялық ыдырау өнімдеріне тән макрокеуекті құрылымның қалыптасқанын көрсетеді. Үлгіде ірі, домалақ түйіршіктер мен ұсақ, бұрышты фрагменттер байқалады, бұл жоғары температурада өңдеу кезінде жартылай ұсақталудың жүруін дәлелдейді.

Мұндай морфология пиролиз кезінде интенсивті газдың бөлінуімен және жоғары температура әсерінде пайда болған дамыған меншікті беттік ауданға ие қатты қалдықтың түзілуімен сипатталады. Техникалық көміртектің микроструктурасы сканерлеуші электрондық микроскоп әдісі арқылы $\times 500$ үлкейту деңгейінде зерттелді.

Жүргізілген SEM-талдау нәтижесінде үлгілер арасындағы морфологиялық айырмашылықтардың негізгі себептері – шикізаттың табиғаты, алыну тәсілі және термиялық өңдеу режимдері анықталды. Бұл айырмашылықтар техникалық көміртекті адсорбенттерде, катализаторларда немесе электрохимиялық материалдарда қолдану мүмкіндігін айқындауда маңызды рөл атқарады.

Рентгендік фазалық талдау (XRD) нәтижелері ТК-1 және ТК-2 үлгілерінің аморфты-графитті құрылымға ие екенін көрсетті (8-сурет).

Екі үлгіде де $2\theta \approx 24$ - 26° аймағында орналасқан кең және салыстырмалы түрде қарқынды дифракциялық шың байқалады, ол көміртек материалдарына тән (002) жазықтыққа сәйкес келеді. Бұл шың графитті қабаттардың жартылай реттелген орналасуын және көміртек торының графитизациялану дәрежесін анықтайды. ТК-1 үлгісінде дифракциялық сызық интенсивтілігі жоғары, айқын шыңдары бар, бұл оның ТК-2 үлгісіне қарағанда жақсы кристалданған құрылымға ие екенін көрсетеді. Ал ТК-2 үлгісінде шыңдары кеңірек және салыстырмалы түрде төмен интенсивтілікке ие. Бұл термиялық өңдеу кезінде графитті құрылым фрагменттерінің түзілуін және



Сурет 8. Техникалық көміртектердің (ТК-1, ТК-2) рентгендік дифрактограммалары.

Кесте 2. Техникалық көміртек үлгілерінің сипаттамалары

Үлгі	BET меншікті беттік ауданы, м ² /г	XRD фазалары	Қолдану аясы
ТК-1	150±0,5	Аморфты-графиттік	Адсорбент, композиттік материалдарға қоспа ретінде, мұнай өнімдерін өңдеу
ТК-2	90±0,5	Аморфты-графиттік	Минералданған материал, газ және сұйық фазаларды тазалау

олардың аморфтық құрылымға ие екенін білдіреді. Сонымен қатар, қосымша әлсіз сигналдар $2\theta \approx 43-45^\circ$ аймағында байқалады және (100) немесе (101) жазықтықтарға сәйкес келеді. Олар графитті көміртектің гексагоналды құрылым элементтерінің ішінара қалыптасқанын дәлелдейді.

Жалпы алғанда, XRD талдауы екі үлгінің де аморфты-графиттік құрылымға ие екенін, графитизация дәрежесі ТК-2 үлгісіне қарағанда ТК-1 үлгісінде біршама жоғары екенін көрсетеді. Алынған нәтижелер екі үлгінің де аз дәрежеде кристалданған көміртекті құрылымға ие екенін, ал олардың арасындағы айырмашылық бастапқы шикізат табиғаты мен пиролиз жағдайларына байланысты екенін көрсетеді.

2-кестеде ЖЖМҚ негізінде алынған техникалық көміртек (ТК-1) және мұнай қалдықтары негізінде алынған техникалық көміртек (ТК-2) үлгілерінің беттік сипаттамалары көрсетілген.

2-кестеде көрсетілген сипаттамалар үлгілердің адсорбенттік қасиеттерін, композиттік материалдарға қоспа ретінде пайдалану мүмкіндігін және газ/сұйық фазаларды тазалауға арналған материалдарды алуға мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелер ТК-1 және ТК-2 үлгілерінің физико-химиялық қасиеттерінің әртүрлі екенін, бұл олардың бастапқы шикізат табиғатына және өңдеу шарттарына байланысты екенін көрсетеді.

4. Қорытынды

Салыстырмалы талдау нәтижелері жанар-жағармай материалдары мен мұнай қалдықтарынан алынған техникалық көміртектер ТК-1 және ТК-2 үлгілерінің физико-химиялық қасиеттерінің елеулі айырмашылығын көрсетті. Элементтік құрам бойынша ТК-1 үлгісі көміртекке бай (C – 80,00 %), ал ТК-2 үлгісінде бейорганикалық қоспалар (Na – 41,51 %, Al – 19,2 %, S – 5,71 %) басым. BET талдау деректері ТК-1 үлгісінде меншікті жоғары беттік ауданы (150 м²/г) және айқын кеуектік құрылым анықталса, ТК-2 үлгісінде BET мәндері төменірек (90 м²/г), кеуек өлшемі біркел-

кі. XRD талдауы екі үлгінің де аморфты-графиттік құрылымға ие екенін, ТК-2 үлгісінде графитизация дәрежесінің жоғары екенін көрсетті.

Осылайша, ТК-1 үлгісі жоғары көміртек мөлшері, жоғары меншікті беттік ауданы және кеуектік құрылымымен өнеркәсіптік адсорбенттер мен катализаторлық материалдарға жарамды. ТК-2 үлгісі термиялық тұрақтылығы жоғары болса да, бейорганикалық қоспалардың көптігі оның функционалды материалдарда қолданылуын шектейді және қосымша модификациялауды қажет ететіндігі анықталды.

Алғыс

Зерттеу Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің Ғылым комитетінің №BR24992915 «Эластомерлі және полимерлі-битумді байланыстырушы негізінде жоғары берікті асфальтобетон алу технологиясын әзірлеу және көміртек қосынды сұйық қалдықтарды плазмохимиялық өңдеу» бағдарламасы шеңберінде жүзеге асырылды.

Әдебиеттер тізімі (ГОСТ)

- [1]. Прохоров В.Ю. Утилизация и вторичное использование отработанных смазочных материалов, транспортных и транспортно-технологических машин // Материалы Междунар. симп. «Надежность и качество». – Пенза, 2017. – Т. 2. – С. 235-238.
- [2]. Okoye C.O., Zhu M., Jones I., Zhang J., Zhang Z., Zhang D. An investigation into the preparation of carbon black by partial oxidation of spent tyre pyrolysis oil // Waste Manag. – 2022. – Vol. 137. – P. 110-120.
- [3]. Sugatri R.I., Wirasadewa Y.C., Saputro K.E., Muslih E.Y., Ikono R., Nasir M. Recycled carbon black from waste of tire industry: thermal study // Microsyst. Technol. – 2018. – Vol. 24. – P. 749-755.
- [4]. Moses K.K., et al. Recycling of waste lubricating oil: A review of the recycling technologies with a

- focus on catalytic cracking, techno-economic and life cycle assessments // *J. Clean. Prod.* – 2023. – Vol. 11(2). – P. 111273.
- [5]. El-Maadawy M., Elzoghby A., Masoud A., et al. Conversion of carbon black recovered from waste tires into activated carbon via chemical/microwave methods for efficient removal of heavy metal ions from wastewater // *RSC Adv.* – 2024. – Vol. 14. – P. 6324-6338.
- [6]. Kyei-Manu W.A., Herd C.R., Chowdhury M., Busfield J.J., Tunnicliffe L.B. The influence of colloidal properties of carbon black on static and dynamic mechanical properties of natural rubber // *Polym.* – 2022. – Vol. 14(6). – P. 1194.
- [7]. Liang X., Ito M., Nakajima K. Reinforcement mechanism of carbon black-filled rubber nanocomposite as revealed by atomic force microscopy nanomechanics // *Polym.* – 2021. – Vol. 13(22). – P. 3922.
- [8]. Han W., Han D., Chen H. Pyrolysis of waste tires: A review // *Polym.* – 2023. – Vol. 15(7). – P. 1604.
- [9]. Cabrera-Escobar C., Moreno-Gutiérrez J., Rodríguez-Moreno R., Pájaro-Velázquez E., Calderay-Cayetano F., Durán-Grados V. A review on global recovery policy of used lubricating oils and their effects on the environment and circular economy // *Environ.* – 2025. – Vol. 12(5). – P. 135.
- [10]. Rikmann E., Mäeorg U., Liiv J. Recycling of low-quality carbon black produced by tire pyrolysis // *Appl. Sci.* – 2024. – Vol. 14(5). – P. 2192.
- [11]. Tanirbergenova S., Ongarbayev Y., Tileuberdi Y., Zhambolova A., Kanzharkan E., Mansurov Z. Selection of solvents for the removal of asphaltene-resin-paraffin deposits // *Process.* – 2022. – Vol. 10. – P. 1262.
- [12]. Fang H., Hou Z., Shan L., Cai X., Xin Z. Influence of pyrolytic carbon black derived from waste tires at varied temperatures within an industrial continuous rotating moving bed system // *Polym.* – 2023. – Vol. 15(16). – P. 3460.
- [13]. Sarkar S., Datta D., Deepak K.S. Comprehensive investigation of various re-refining technologies of used lubricating oil: A review // *J. Mater. Cycles Waste Manag.* – 2023. – Vol. 25(4). – P. 1935-1965.
- [14]. Tanirbergenova S., Tagayeva A., Rossi C.O., Porto M., Caputo P., Kanzharkan E., Tugelbayeva D., Zhylybayeva N., Tazhu K., Tileuberdi Y. Studying the characteristics of tank oil sludge // *Process.* – 2024. – Vol. 12(9). – P. 2007.
- [15]. Jiang H., Shao J.A., Zhu Y., et al. Production mechanism of high-quality carbon black from high-temperature pyrolysis of waste tire // *J. Hazard. Mater.* – 2023. – Vol. 443. – P. 130350.
- [16]. Патент 11039. РК. Способ получения технического углерода // С.К. Танирбергенава, Н.К. Жилыбаева, Д.А. Тугельбаева, и др. – Оpub. 22.08.2025.
- [17]. Tian L., Liu T., Yang J., Zhao Y., Huang Q., Huang Z. Direct production and characterization of carbon black from organic hazardous wastes via high temperature pyrolysis and volatiles condensation // *J. Environ. Chem. Eng.* – 2025. – Vol. 13(5). – P. 119206.
- [18]. Tsai W.T., Lin Y.Q. Preparation and characterization of porous carbon composites from oil-containing sludge by a pyrolysis-activation process // *Process.* – 2022. – Vol. 10(5). – P. 834.

References

- [1]. V.Y. Prokhorov. Utilization and reuse of spent lubricating materials of transport and transport-technological machines, *Proc. Int. Symp. "Reliability and Quality"*, 2 (2017) 235-238. (In Russian).
- [2]. C.O. Okoye, M. Zhu, I. Jones, et al. An investigation into the preparation of carbon black by partial oxidation of spent tyre pyrolysis oil, *Waste Manag.*, 137 (2022) 110-120. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.027>.
- [3]. R.I. Sugatri, Y.C. Wirasadewa, K.E. Saputro, et al. Recycled carbon black from waste of tire industry: thermal study, *Microsyst. Technol.*, 24 (2018) 749-755. <https://doi.org/10.1007/s00542-017-3397-6>.
- [4]. K.K. Moses, A. Aliyu, A. Hamza, et al. Recycling of waste lubricating oil: A review of the recycling technologies with a focus on catalytic cracking, techno-economic and life cycle assessments, *J. Clean. Prod.*, 11 (2) (2023) 111273. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111273>.
- [5]. M. El-Maadawy, A. Elzoghby, A. Masoud, et al. Conversion of carbon black recovered from waste tires into activated carbon via chemical/microwave methods for efficient removal of heavy metal ions from wastewater, *RSC Adv.*, 14 (2024) 6324-6338. <https://doi.org/10.1039/D4RA00172A>.
- [6]. W.A. Kyei-Manu, C.R. Herd, M. Chowdhury, et al. The influence of colloidal properties of carbon black on static and dynamic mechanical properties of natural rubber, *Polym.*, 14 (6) (2022) 1194. <https://doi.org/10.3390/polym14061194>.
- [7]. X. Liang, M. Ito, K. Nakajima. Reinforcement mechanism of carbon black-filled rubber nanocomposite as revealed by atomic force

- microscopy nanomechanics, Polym., 13 (22) (2021) 3922. <https://doi.org/10.3390/polym13223922>.
- [8]. W. Han, D. Han, H. Chen. Pyrolysis of waste tires: A review, Polym., 15 (7) (2023) 1604. <https://doi.org/10.3390/polym15071604>.
- [9]. C. Cabrera-Escobar, J. Moreno-Gutiérrez, R. Rodríguez-Moreno, et al. A review on global recovery policy of used lubricating oils and their effects on the environment and circular economy, Environ., 12 (5) (2025) 135. <https://doi.org/10.3390/environments12050135>.
- [10]. E. Rikmann, U. Mäeorg, J. Liiv. Recycling of low-quality carbon black produced by tire pyrolysis, Appl. Sci., 14 (5) (2024) 2192. <https://doi.org/10.3390/app14052192>.
- [11]. S. Tanirbergenova, Y. Ongarbayev, Y. Tileuberdi, et al. Selection of solvents for the removal of asphaltene-resin-paraffin deposits, Process., 10 (2022) 1262. <https://doi.org/10.3390/pr10071262>.
- [12]. H. Fang, Z. Hou, L. Shan, et al. Influence of pyrolytic carbon black derived from waste tires at varied temperatures within an industrial continuous rotating moving bed system, Polym., 15 (16) (2023) 3460. <https://doi.org/10.3390/polym15163460>.
- [13]. S. Sarkar, D. Datta, K.S. Deepak. Comprehensive investigation of various re-refining technologies of used lubricating oil: A review, J. Mater. Cycles Waste Manag., 25 (4) (2023) 1935–1965. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01685-w>.
- [14]. S. Tanirbergenova, A. Tagayeva, C.O. Rossi, et al. Studying the characteristics of tank oil sludge, Process., 12 (9) (2024) 2007. <https://doi.org/10.3390/pr12092007>.
- [15]. H. Jiang, J.A. Shao, Y. Zhu, et al. Production mechanism of high-quality carbon black from high-temperature pyrolysis of waste tire, J. Hazard. Mater., 443 (2023) 130350. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130350>.
- [16]. Tanirbergenova SK, Zhylybayeva NK, Tugelbayeva DA, et al. (2025) Method of obtaining carbon black [Sposob polucheniya tekhnicheskogo ugleroda]. Patent for Utility Model of the Republic of Kazakhstan No. 11039.
- [17]. L. Tian, T. Liu, J. Yang, et al. Direct production and characterization of carbon black from organic hazardous wastes via high temperature pyrolysis and volatiles condensation, J. Environ. Chem. Eng., 13 (5) (2025) 119206. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119206>.
- [18]. W.T. Tsai, Y.Q. Lin. Preparation and characterization of porous carbon composites from oil-containing

sludge by a pyrolysis-activation process, Process., 10 (5) (2022) 834. <https://doi.org/10.3390/pr10050834>.

Авторлар туралы мәліметтер

С.К. Танирбергенова – х.ғ.к, Жану проблемалары институты, нанобиотехнология зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан
E-mail: sandu2201@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6377-0913>

Д.А. Тугелбаева – Жану проблемалары институты, нанобиотехнология зертханасының ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан
E-mail: dilya.12@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7860-5710>

Н.К. Жылыбаева – х.ғ.к, Жану проблемалары институты, нанобиотехнология зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан
E-mail: icp30@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8047-916X>

А.Н. Айтуған – Жану проблемалары институты, нанобиотехнология зертханасының ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан
E-mail: aizat_9_3@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3302-9363>

К. Тажу – Жану проблемалары институты, нанобиотехнология зертханасының ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан
E-mail: qairat.hairat@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1884-8635>

Г.М. Молдажанова – Жану проблемалары институты, нанобиотехнология зертханасының аға ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан
E-mail: mmgulya70@mail.ru

З.А. Мансуров – Жану проблемалары институты, Институттың ғылыми жетекшісі, бас директор кеңесшісі, Алматы, Қазақстан
E-mail: zmansurov@kaznu.kz
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8956-216X>

Production of Carbon Black by Pyrolytic Processing of Carbon-Containing Wastes

S.K. Tanirbergenova*, D.A. Tugelbayeva, N.K. Zhylybayeva, A.N. Aitugan, K. Tazhu, G.M. Moldazhanova, Z.A. Mansurov

Institute of Combustion Problems, Bogenbai Batyr St., 172, Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

This study aims to investigate the possibility of obtaining carbon black with low ash content and a high specific surface area by pyrolytic processing of carbon-containing wastes, particularly petroleum residues and spent lubricating oils. The operating parameters of the pyrolysis process and the characteristics of the resulting carbon black were examined. The morphological, elemental, and structural properties of the obtained solid products (carbon black) were analyzed using modern physicochemical methods. Elemental analysis showed that the carbon black sample (TK-1) derived from spent lubricating oils contains predominantly carbon (78%), whereas the sample (TK-2) obtained from petroleum waste exhibits an increased content of inorganic elements (Si, Al, Fe, etc.). SEM micrographs revealed that TK-1 has a loose, highly porous structure, while TK-2 is characterized by a mineralized, coarse-grained morphology. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed that both samples possess an amorphous graphite-like structure. The specific surface area determined by the BET method was 150 m²/g for TK-1 and 90 m²/g for TK-2. The results demonstrate that the TK-1 material obtained from spent lubricating oils, due to its high carbon content and well-developed surface, is a promising material for use as an adsorbent, catalyst, and a component in composite materials. It was found that the TK-2 sample derived from petroleum waste requires additional modification and purification stages due to the high amount of inorganic impurities. Keywords: carbon black, fuels and lubricants, pyrolysis, recycling, carbon-containing wastes.

Keywords: carbon black, fuels and lubricants, pyrolysis, recycling, carbon-containing wastes.

Получение технического углерода пиролитической переработкой углеродсодержащих отходов

С.К. Танирбергенова*, Д.А. Тугелбаева, Н.К. Жылыбаева, А.Н. Айтүган, К. Тажу, Г.М. Молдажанова, З.А. Мансуров

Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Данное исследование направлено на изучение возможности получения технического углерода с низким содержанием золы и высокой удельной поверхностью путем переработки углеродсодержащих отходов, в частности, нефтяных остатков и отработанных горюче-смазочных материалов методом пиролиза. В статье изучены режимы процесса пиролиза и характеристики полученного технического углерода. Морфологические, элементные и структурные свойства полученных твердых продуктов (технического углерода) были проанализированы современными физико-химическими методами. По результатам элементного анализа установлено, что технический углерод (TK-1), полученный из ОГСМ, содержит преимущественно углерод (78%), тогда как в образце (TK-2), полученном из нефтяных отходов, наблюдается повышенное содержание неорганических элементов (Si, Al, Fe и др.). Микрофотографии, полученные методом SEM, показали, что образец TK-1 имеет рыхлую, высокопористую структуру, в то время как образец TK-2 характеризуется минерализованной, крупнозернистой морфологией. Рентгенофазовый дифракционный анализ (XRD) подтвердил, что оба образца имеют аморфно-графитоподобную структуру. Удельная поверхность, определенная по методу БЭТ, составила 150 м²/г для TK-1 и 90 м²/г для TK-2. Результаты исследования показали, что технический углерод TK-1, полученный из ОГСМ, благодаря высокому содержанию углерода и развитой поверхности является перспективным материалом для применения в качестве адсорбента, катализатора и компонента композитных материалов. Установлено, что образец TK-2, полученный из нефтяных отходов, требует дополнительных стадий модификации и очистки из-за большого количества неорганических примесей.

Ключевые слова: технический углерод, топливно-смазочные материалы, пиролиз, переработка, углеродсодержащие отходы.