

FTAMP 61.29.39 : 70.25.17

А.Т. Исмайл<sup>1</sup> – негізгі автор, | ©  
А.А. Куртебаева<sup>2</sup>, М.С. Калмаханова<sup>3</sup>



<sup>1</sup>Магистрант, <sup>2</sup>Докторант, <sup>3</sup>PhD, қауымдастырылған профессор

ORCID

<sup>1</sup><https://orcid.org/0009-0006-6247-4166> <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-1975-0755>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-8635-463X>



<sup>1,2,3</sup>М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті,



Тараз, Қазақстан



<sup>1</sup>[ayaulym.ismayl@mail.ru](mailto:ayaulym.ismayl@mail.ru)

<https://doi.org/10.55956/OJCX3816>

## ТАЗАРТУ ҚҰРЫЛЫСТАРЫНЫҢ САРҚЫНДЫ СУЛАРЫНАН ЛАСТАҒЫШТАРДЫ, СОНЫҢ ІШІНДЕ МИКРОПЛАСТИКТІ ЖОЮҒА АРНАЛҒАН ЖЕРГІЛІКТІ ҚАЛДЫҚТАН АЛЫНҒАН БИОКӨМІРДІҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

**Аңдатпа.** Қазіргі таңда қоршаған ортаның ластануы, әсіресе тазарту құрылыстарынан шығатын сарқынды сулар құрамындағы қауіпті ластағыштардың көбеюі өзекті мәселелердің бірі болып табылады. Бұл зерттеуде ауыл шаруашылығы-өнеркәсіптік қалдығынан (жүгері собығынан) химиялық белсендіру әдісі арқылы жүгері биокөмірі (СВ600С) алынды. СЭМ, ТГА, БЭТ, FT-IR, бөлшектердің өлшемін талдағыш анализы, элементтік көміртек анализы сияқты әдістермен жүргізілген толық сипаттама тұрақты органикалық ластағыштарды, соның ішінде микропластикті суда тиімді ұстай алатын материалға айналдыратынын растады. Алынған СВ600С материалының тиімділігі адсорбция процесінде поливинилхлорид (ПВХ) ластағышын жоюда жүгері биокөмірін қолдана отырып бағаланды. Алынған нәтижелер ауыл шаруашылығы-өнеркәсіптік қалдықтан алынған СВ600С материалының экологиялық қауіпсіз, оңай катализатор ретінде ластанған ағынды суларды терең тазартуда қолдану әлеуеті жоғары екенін көрсетеді.

**Тірек сөздер:** биокөмір, поливинилхлорид, сарқынды су, адсорбция.



Исмайл, А.Т. Тазарту құрылыстарының сарқынды суларынан ластағыштарды, соның ішінде микропластикті жоюға арналған жергілікті қалдықтан алынған биокөмірдің физика-химиялық қасиеттерін зерттеу [Мәтін] / А.Т. Исмайл, А.А. Куртебаева, М.С. Калмаханова // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2026. – №3(93). – Б.455-466. <https://doi.org/10.55956/OJCX3816>

**Кіріспе.** Дүние жүзінде тұщы су жүйелерінің мыңдаған өнеркәсіптік және табиғи химиялық қосылыстармен ластануының артуы адамзат алдында тұрған негізгі экологиялық проблемалардың бірі болып табылады. Бұл қосылыстардың көпшілігі төмен концентрацияда болғанымен, олардың көпшілігі, әсіресе күрделі қоспалардың құрамдас бөліктері ретінде болған кезде, айтарлықтай токсикологиялық алаңдаушылық тудырады [1].

Жер асты сулары су ресурстарының ішіндегі ең маңыздыларының бірі болып саналады. Бұл құнды ресурс экологиялық және әлеуметтік тұрғыдан

үлкен рөл атқарады. Сонымен қатар, жер асты сулары ауыл шаруашылығы аймақтарының тұрақтылығын қамтамасыз етуде маңызды орын алады, өйткені олар өнімділікті сақтап, азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз етуге ықпал етеді [2,3]. Алайда микропластик топырақ арқылы, әсіресе ағынды сулардың қозғалысы нәтижесінде, жер асты суларына жетуі мүмкін, бұл олардың ластануының маңызды көзі болып табылады [4].

Осы тұрғыда биокөмір ерекше назар аудартады. Биокөмір-бұл биомасса пиролизі нәтижесінде пайда болатын жоғары көміртекті материал, мысалы ауылшаруашылық және өнеркәсіптік қалдықтарды айтсақ болады [5]. Органикалық биомассаны пиролиздеу кезінде көміртекке бай биокөмір түзіледі. Бұл зат ағынды суларды тазарту және топырақты қалпына келтіру саласында кеңінен қолданылады, себебі ол органикалық ластағыштарды, ауыр металдарды және микропластиктерді тиімді адсорбциялау қабілетіне ие. Биокөмірдің микропластиктерді жоюдағы қолданылуы ерекше перспективалы болып табылады, өйткені ол ауыл шаруашылығы мен органикалық қалдықтарды пайдалану арқылы экологиялық таза шешім ұсынады және айналмалы экономика қағидаттарына сәйкес келеді. Зерттеулерге сәйкес, биокөмірдің физика-химиялық қасиеттері, соның ішінде гидрофобтық әрекеттесулері, жоғары кеуектілігі және беткі зарядтарының ерекшелігі, оның микропластиктерге деген тартылысын арттырып, оларды су ортасынан тиімді түрде бөліп алуға мүмкіндік береді [6-9].

Осыған байланысты, бұл жұмыстың мақсаты – Оңтүстік Қазақстанның жергілікті қалдықтары негізінде биокөмір өндіру және оны фармацевтикалық ластағыштарды жоюға арналған өткізгіш реактивті тосқауылдарда қолдану мүмкіндігін зерттеу болып табылады.

Биокөмір ретінде ауылшаруашылық қалдығы (жүгері) алынды. Жүгеріден алынған биокөмір жоғары кеуектілікке, үлкен меншікті бет ауданына, адсорбциялық қабілетке, минералдарға бай, бұл ластағыштарды ұстап қалуда өте тиімді және қалдықсыз өнім болып табылады.

**Зерттеу шарттары мен әдістері.** *Қажетті құрал-жабдықтар:* тік құбырлы пеш, кептіру жылдамдығы 0-300°C, жылдамдығы  $\geq 4^\circ\text{C}/\text{мин}$ , 300-600°C, жылдамдығы  $\geq 5^\circ\text{C}/\text{мин}$ , 600-1000°C, жылдамдығы  $\geq 4^\circ\text{C}/\text{мин}$ , 1000-1000°C, 120 минут ұстау режимі, аналитикалық таразылар, ыстыққа төзімді қысқыштар, ұсақтағыш пен ерітіндіге арналған шпатель, зертханалық таразылар, калий гидроксиді (KOH), өлшеуіш шыныаяқтар, колбалар, жүгері тұқымдары, сорғы, тазартылған су.

**Биокөмір өндіру әдісі.** Ауылшаруашылық қалдығынан өндірілген биокөмірдің саркынды судан ластағыштарды жою әсерін бақылау үшін зерттеу жұмыстары жүргізілді. Жүгері собығы құрғатылып, ұсақталап және електен өткізілді. Тазартылған жүгері собығы 1 сағат бойы  $\text{N}_2$  азотты пеште 350°C-та, алдын ала көміртектілендірілді содан кейін табиғи түрде бөлме температурасына дейін салқындатылды. Жеңілдету үшін алдын ала көміртекті жүгері WNC деп белгіленді. Белсендірілген KOH және WNC (0,2 г) KOH/WNC массалық қатынасы 3:1 болатын 2,5 мл тазартылған суда KOH белсендіру агентімен (0,6 г) араластырылды, содан кейін алынған қоспа KOH біркелкі көміртегі ерітіндісіндегі суспензияны алу үшін 10 минут бойы ультрадыбыспен өңделеді. Өңделгеннен кейін 24 сағатқа шейкерге қойылды. Толық белсендірілгеннен кейін, дайындалған үлгі pH-ы 5; 5.5-ке келгенше дистилденген сумен мұқият жуылды, содан кейін 60°C температурада кептіргіш шкафта кептірілді. Кейіннен 350°C-тағы жүгері собығынан алынған көміртекті жүгері  $\text{N}_2$  азотты пеште 600°C-та 1 сағат бойы тағы да

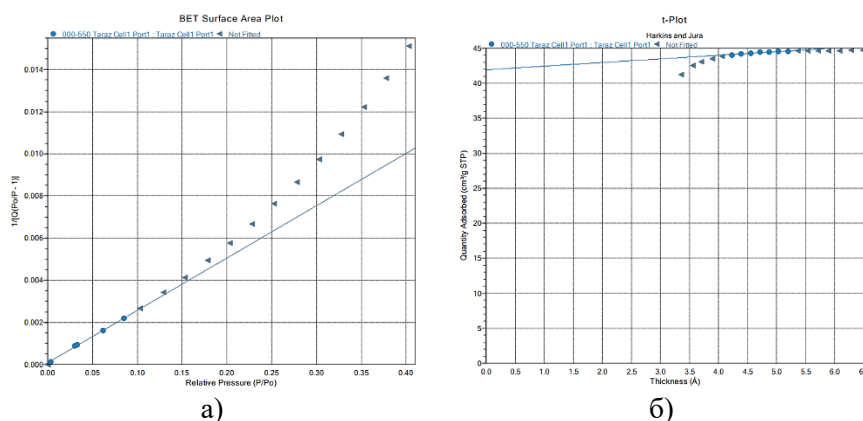
көміртектендірілді. Сөйтіп CB600C биокөмірі алынды. Синтез процедурасының схемасы 1-суретте келтірілген.



Сурет 1. Жүгері собығынан биокөмір өндіру процесі

**Биокөмірдің сипаттамасы.** Материалдың кеуектілігі мен беттік көлемін анықтайтын, физосорбция және хемосорбция негізінде жұмыс істейтін жоғары өнімді автоматты микрокеуек анализаторы 3Flex БЭТ көмегімен зерттелді. Материалдың морфологиялық қасиеттері өрістік-эмиссиялық сканерлеуші электронды микроскоп (FE-SEM, Zeiss Sigma SEM типті) көмегімен зерттелді. Материалдың термиялық тұрақтылығы NETZSCH STA 449 F3 синхронды термиялық анализаторы арқылы зерттелді. Заттардың құрамындағы химиялық байланыстар мен функционалдық топтарды анықтау үшін FTIR (Инфрақызыл спектроскопия) сызығы қолданылды. Үлгідегі химиялық элементтердің үлесін анықтау үшін элементтік көміртек анализы Elementrac CS-I қолданылды. Материалдағы бөлшектердің өлшемі Антон паар Litesizer DIF 500 анализаторы арқылы зерттелді.

**Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау.** БЭТ CB600C анализі. Материалдың кеуектілігі мен беттік көлемін анықтау үшін Брунауэр-Эмметт-Теллер теориясы (БЭТ) қолданылды. Бұл әдіс материалдың меншікті беткі ауданын анықтай отырып, жоғары дәлдікпен жұмыс істейді.



Сурет 2. CB600C БЭТ талдауы: а) БЭТ бойынша меншікті беті;  
б) Кеуектердің жалпы көлемі

Сұйық азот температурасында үлгі алдын-ала қыздырылып, ішіндегі су, газ, ұшқыш заттар толық шығарылған. Алынған изотерма – саңылау тәрізді

тесіктері бар микрокеукті материал екендігін көрсетті. Мезопоралар іс жүзінде жоқ, олардың аз мөлшерін бөлшектер аралық кеңістікпен түсіндіруге болады. Кеуктердің жалпы көлемі 0,071 см<sup>3</sup>/г құрайды, мұнда 90%-дан астамы микрокеуктерден тұрады. Әр түрлі модельдерден алынған нәтижелер бір-біріне жақсы сәйкес келеді. Мұндай сипаттамалар органикалық бастапқы шикізаттарды терең белсендірусіз немесе активтендіру жағдайында карбонизациялау арқылы алынған көміртекті материалдарға тән. ВЕТ және DFT модельдері арасындағы нақты беттік мәндердегі үлкен айырмашылықтарды адсорбциялық потенциалдардың қабаттасуының жоғарылауымен түсіндіруге болады, сонымен қатар микропораларды толтыру ВЕТ-ті бір молекулалық қабаттың түзілуі ретінде қарастырады, дегенмен бұл физикалық тұрғыдан кеуктердің көлемді толтырылуына мүмкіндік береді. БЭТ бойынша CB600C кеуктік құрылым параметрлері 1-кестеде көрсетілген.

Кесте 1

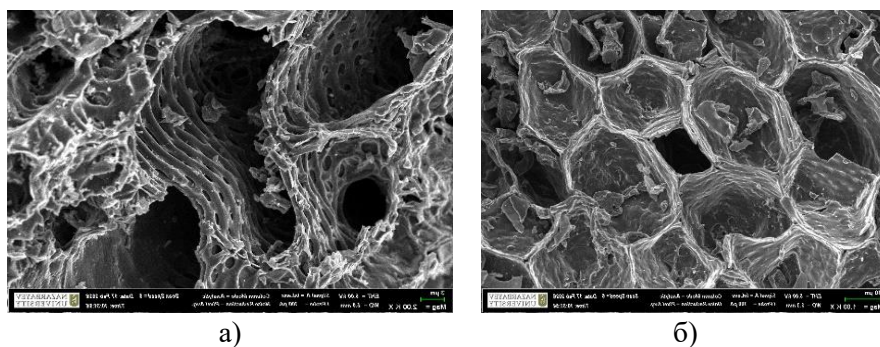
БЭТ бойынша CB600C кеуктік құрылым параметрлері

| Параметрі                                       | Мәні                     |
|-------------------------------------------------|--------------------------|
| ВЕТ бойынша меншікті беті                       | 174 м <sup>2</sup> /г    |
| Кеуктердің жалпы көлемі                         | 0,071 см <sup>3</sup> /г |
| DFT бойынша микропоралардың көлемі              | 0,063 см <sup>3</sup> /г |
| DFT бойынша меншікті беті                       | 104 м <sup>2</sup> /г    |
| DFT бойынша микропоралардың көлемі              | 0,065 см <sup>3</sup> /г |
| Hogwartz-Kowazoe бойынша микропоралардың көлемі | 0,064 см <sup>3</sup> /г |

Материалдың меншікті беткі ауданының мәні 174 м<sup>2</sup>/г көрсетті. Бұл 1 г биокөмірде өте үлкен ауданның бар екенін білдіреді. Бет ауданы үлкен болған сайын адсорбция қабілеті де жақсы болады. Барлық кеуктердің жалпы көлемі 0,071 см<sup>3</sup>/г болды. Яғни 1 г материал ішінде осыншалықты бос кеук кеңістік бар екенін білдіреді. DFT бойынша микрокеуктердің көлемі 0,063 см<sup>3</sup>/г мәнді көрсетті, яғни материал негізінен микрокеукті екенін білдіреді. DFT бойынша меншікті беті 104 м<sup>2</sup>/г болды. ВЕТ жалпы бет ауданын бағаласа, DFT кеук құрылымын нақтырақ есептейді, яғни микрокеуктерді дәлірек сипаттайды. Hogwartz-Kowazoe бойынша микрокеуктердің көлемі 0,064 см<sup>3</sup>/г мәнді көрсетті. Бұл әдіс арқылы микрокеуктердің нақты бар екенін көруімізге болады. Әр түрлі шикізаттан алынған биокөмірдің кеук құрылымы тіпті бірдей жағдайда дайындалған кезде де әр түрлі болуы мүмкін. Дұрыс термиялық өңдеу ВЕТ бетінің ауданын және кеуктердің жалпы көлемін едәуір арттыра алады, осылайша биокөмірдің адсорбциялық қабілетін жақсартады. Дегенмен, шамадан тыс қарқынды термиялық өңдеу тері тесігін зақымдауы және құрылымның бұзылуына әкелуі мүмкін [10].

*СЭМ CB600C анализі.* Биомасса үлгісінің беткі құрылымын зерттеу үшін сканерлеуші электронды микроскопия (СЭМ) қолданылды. Бұл әдіс биомасса материалдарының беткі морфологиясы мен текстуралық ерекшеліктерін талдау және визуализациялау үшін өте тиімді [11].

Сонымен қатар бұл әдіс материалдың морфологиясын, құрылымдық ерекшеліктерін және химиялық құрамын анықтауға мүмкіндік берді.



Сурет 3. CB600C СЭМ талдауы

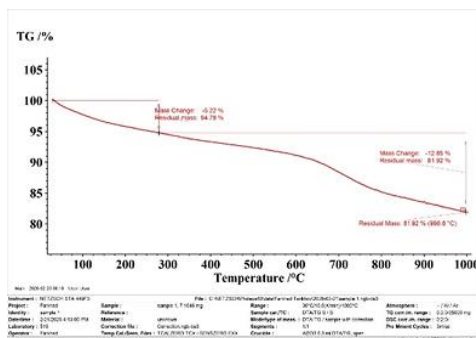
За суретте биокөмірдің құрылымы айқын көрінеді және ол губка тәрізді, жоғары кеуекті торлы морфологиямен сипатталады. Суреттегі масштаб 100 мкм, бұл микроқұрылымды нақты бағалауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар көптеген ірі және орташа кеуектер байқалады, олардың пішіні дұрыс емес, әртүрлі геометриялық формада орналасқан. Бұл кеуектердің пайда болуы жүгері өсімдік тіндерінің пиролиз процесі кезінде органикалық компоненттердің ыдырауымен байланысты. Олардың өлшемдік сипаттамалары: ірі макрокеуектер: шамамен 30–100 мкм, орташа кеуектер: 10–30 мкм, ұсақ кеуектер: 1–10 мкм. Кейбір кеуектердің қабырғалары жұқа және сынғыш болып көрінеді, бұл жоғары температурада карбонизация процесінің әсерін көрсетеді. Сонымен қатар, кеуектердің бір-бірімен байланысқан жүйе құрайтыны байқалады, яғни материал ішінде ашық кеуекті құрылым қалыптасқан. Бұл ерекшелік биокөмірдің: жоғары меншікті беткі ауданға ие болуына, адсорбциялық қасиеттерінің артуына, сұйық және газ фазасындағы заттарды сіңіру қабілетінің жоғары болуына тікелей әсер етеді. Сонымен қатар беткі қабаттың біркелкі емес, бұдырлы екені байқалады. Бұл реакциялық белсенді орталардың (активті орталықтардың) көп екенін көрсетеді.

Зб суретте биокөмірдің құрылымы бірінші суретпен салыстырғанда тығыздық және ұсақ дисперсті бөлшектермен жабылған күйде көрінеді. Масштаб мұнда 10 мкм. Бұл суретте кеуектердің мөлшері кішірек және олардың саны көп екені байқалады. Сонымен қатар, беткі қабатта әртүрлі пішіндегі бөлшектер мен қабатталған құрылым элементтері бар. Кейбір аймақтарда қабыршақ тәрізді құрылымдар және микрожарықтар байқалады. Бұл құбылыс пиролиз кезінде ұшқыш заттардың бөлінуінен кейін қалған құрылымдық өзгерістердің нәтижесі болып табылады. Суретте сонымен қатар тығыз аймақтар кездеседі, бұл толық карбонизацияланбаған органикалық қалдықтар немесе минералды компоненттердің (күл қалдықтары) болуымен түсіндіріледі.

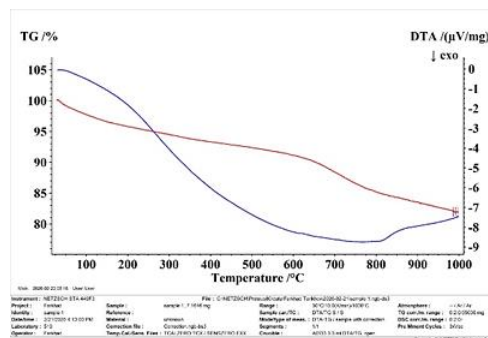
*ТГА сызығының талдаулары.* Жүгері негізіндегі биокөмірдің термиялық қасиеттері мен құрылымдық ерекшеліктерін анықтау мақсатында термогравиметриялық (TG) және дифференциалды термиялық талдау (DTA) әдістері жүргізілді (4,5-суреттер). TG әдісі арқылы үлгінің қыздыру барысында массасының өзгеруі бақыланса, DTA талдауы материалда орын алатын жылулық құбылыстарды сипаттауға мүмкіндік береді.

TG сызығының талдау нәтижесінде температураның жоғарылауына байланысты биокөмір массасының біртіндеп азаятындығы анықталды. 30–300°C аралығында шамамен 5,22% масса жоғалуы байқалып, бұл құбылыс негізінен үлгі құрамындағы ылғалдың және төмен температурада буланатын

ұшқыш компоненттердің жойылуымен түсіндіріледі. 300–700°C диапазонында массаның баяу төмендеуі органикалық қосылыстардың термиялық ыдырау процесіне сәйкес келеді. Ал 700–1000°C аралығында қосымша 12,85% масса жоғалуы тіркеліп, бұл көміртекті құрылымның әрі қарай өзгеріске ұшырауын көрсетеді. Соңғы қалдық массаның 81,92% деңгейінде сақталуы зерттелген материалдың жоғары дәрежеде термиялық тұрақтылығын дәлелдейді.



Сурет 4. CB600C ТГА-сызығы



Сурет 5. CB600C ДТА-сызығы

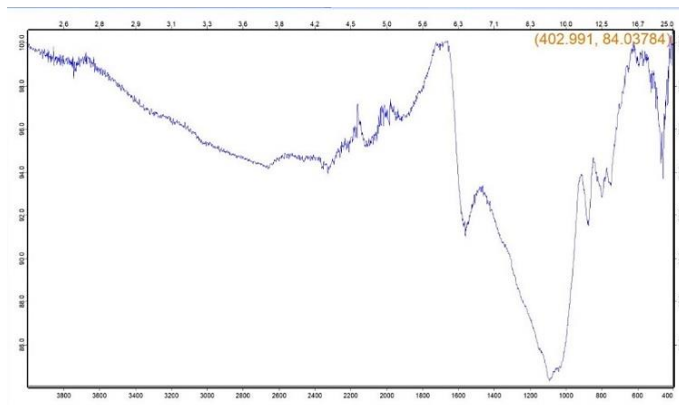
ДТА нәтижелері TG деректерін толықтыра отырып, қыздыру процесі кезінде жүретін жылулық әсерлерді нақтылайды. 100–300°C температура аралығында байқалған эндотермиялық эффект ылғалдың булануымен байланысты. 300–600°C диапазонында тіркелген өзгерістер органикалық құрам бөліктерінің ыдырауымен түсіндіріледі. 600–800°C аралығында ДТА қисығында айқын минимумның байқалуы көміртек құрылымының қайта ұйымдасуы мен тұрақтану процестерін білдіреді. Ал 800°C-тан жоғары температураларда жылулық эффектілердің әлсіреуі материалдың тұрақты күйге өткенін көрсетеді.

Термогравиметриялық талдау (TGA) әдетте әртүрлі қыздыру жылдамдығындағы температура мен уақытқа байланысты массаның өзгеруін бақылау арқылы биомассаның жылу әрекетін бағалау үшін қолданылады [12]. Биомассаның термиялық ыдырауы әдетте бірнеше кезеңнен өтеді, соның ішінде ылғалдың булануы, ұшпа заттардың бөлінуіне байланысты белсенді пиролиз және күйдірілген қалдықтың пайда болуын жатқызуымызға болады. Белсенді пиролиз кезеңін екі бөлек кезеңге бөлуге болады: ұшпа қосылыстардың бөлінуі және биомасса бөлшектерінің айналасындағы осы ұшпа заттардың кейінгі тотығуы [13]. TGA термиялық деструкция сипаттамаларын және уақыт өте келе биомасса материалдарының тұрақтылығын зерттеудің тиімді және сенімді әдісі болып саналады [14].

*ИҚ сызығының талдаулары.* Заттардың құрамындағы химиялық байланыстар мен функционалдық топтарды анықтау үшін ИҚ сызығы қолданылды.

6-суретте жүгері собығынан алынған биокөмірдің инфрақызыл (ИҚ) спектроскопиялық талдауы көрсетілген. Биокөмір материалының функционалдық топтарын, химиялық байланыстарын және бетінің химиялық құрамын анықтау үшін талдау жүргізілді. Бұл әдіс пиролизден кейін биокөмірде сақталатын органикалық және бейорганикалық құрылымдар туралы, сондай-ақ термиялық өңдеу кезінде пайда болатын химиялық түрлендірулер туралы құнды ақпарат береді. Сонымен қатар, ИҚ сипаттамасы биокөмірдің адсорбциялық қасиеттерін түсіндіруде маңызды рөл атқарады,

өйткені беттік функционалды топтар ластаушы заттармен өзара әрекеттесуге тікелей қатысады. Жүгері собығынан алынған биокөмірдің ИҚ спектрінде сіңірудің бірнеше тән аймақтарын ажыратуға болады.



Сурет 6. CB600C ИҚ сызығының талдаулары

CB600C құрамының ИҚ-спектрі 2-кестеде келтірілген.

Кесте 2.

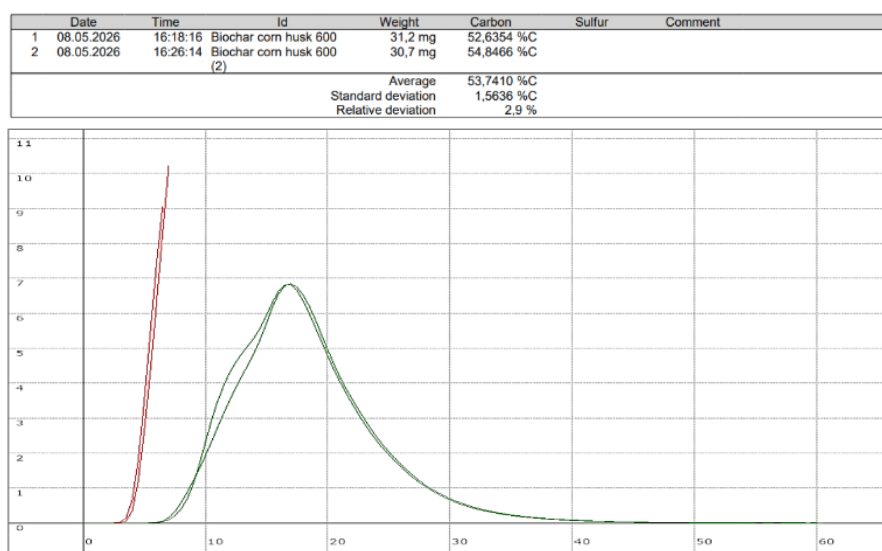
CB600C құрамының ИҚ-спектрі

| Жүгері биокөмірі (CB600C) | Минералдық компоненттердің тербелісі (см <sup>-1</sup> ) | Ароматты сақиналардың иілу тербелісі (см <sup>-1</sup> ) | Спирттік және фенолдық топтар (см <sup>-1</sup> ) | Ароматты карбонил топтары (см <sup>-1</sup> ) | Алифатты байланыстар (см <sup>-1</sup> ) | Гидроксил топтары (см <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|
| Тараз                     | 400-700                                                  | 800-900                                                  | 1000-1200                                         | 1600-1700                                     | 2800-3000                                | 3200-3800                             |

Байқалған бірінші жалпы шың 3200-3600 см<sup>-1</sup> шамасында табылды-бұл гидроксил топтары (О-Н) мен адсорбцияланған судың болуын білдіретін созылу тербелістеріне сәйкес келеді. Бұл адсорбция тиімділігін арттыра отырып, адсорбат молекулаларымен сутектік байланыстар түзу үшін беттік гидроксил топтары бар екенін көрсетеді [15]. Бұл функционалды топтар әдетте бастапқы биомасса құрылымында болатын спирттермен және қалдық ылғалмен байланысты болып келеді. Мұндай гидроксил топтары материалдың судың жақсы сіңіру қабілетін күшейтеді және су ортасындағы ластаушы заттармен сутегі байланысының өзара әрекеттесуін жеңілдетеді. 2800-3000 см<sup>-1</sup> диапазонындағы әлсіз сіңіру сигналдары алифатты С-Н байланыстарының созылу тербелістеріне сәйкес келеді. Бұл ерекшеліктер, әдетте, бастапқыда биомассада болатын целлюлоза мен гемицеллюлозаның қалдық құрылымдарымен байланысты. Осылайша, бұл аймақ биокөмірдің көмірленуінің жоғары дәрежесін көрсетеді. 1600-1700 см<sup>-1</sup> аймағындағы айқын шыңды карбонил (С=О) топтарына, сондай-ақ С=С созылуының хош иісті тербелістеріне жатқызуға болады. Хош иісті көміртекті торлардың түзілуі биокөмірдің химиялық тұрақтылығына ықпал етеді және оның адсорбциялық қасиеттерін жақсарты алады. 1000-1200 см<sup>-1</sup> бұл диапазонда кездесетін сіңіру жолақтары әдетте С-О созылу тербелістерімен байланысты, бұл спирттер,

фенолдық қосылыстар, эфирлер сияқты функционалды топтардың болуын көрсетеді. Бұл оттегі бар топтар қосымша белсенді орталықтарды қамтамасыз ету және беттік өзара әрекеттесу арқылы адсорбцияға ықпал ете алады [16]. 800-900  $\text{см}^{-1}$  диапазонында байқалған шыңдар сақиналы құрылымдардың иілу тербелістерін көрсетеді. Мұндай хош иісті бөліктер биокөмірдің термиялық және химиялық тұрақтылығын арттырады. 400-700  $\text{см}^{-1}$  аймағындағы әлсіз сіңіру жүгері собығының биомассасында табиғи түрде болатын минералды компоненттерге немесе металл-оттегі байланыстарының тербелістеріне байланысты болуы мүмкін. Бұл жолақтар термиялық өңдеуден кейін қалған бейорганикалық заттарды көрсетеді.

**Элементтік көміртек анализі.** Үлгінің материал құрамындағы химиялық элементтердің мөлшерін анықтау үшін элементтік көміртек анализі пайдаланылды (7-сурет). Биокөмірде немесе биомассада: көміртек (C), сутек (H), азот (N), күкірт (S), кейде оттегі (O) пайыздық құрамын анықтайды. Бұл анализ арқылы: материалдың көмірлену дәрежесін, органикалық құрамын, ароматты құрылымдардың түзілуін және адсорбциялық қасиетке ықпалын бағалауға болады.

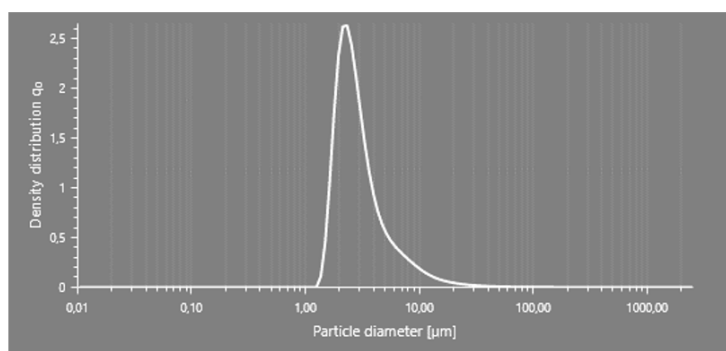


Сурет 7. СВ600С элементтік көміртек анализі

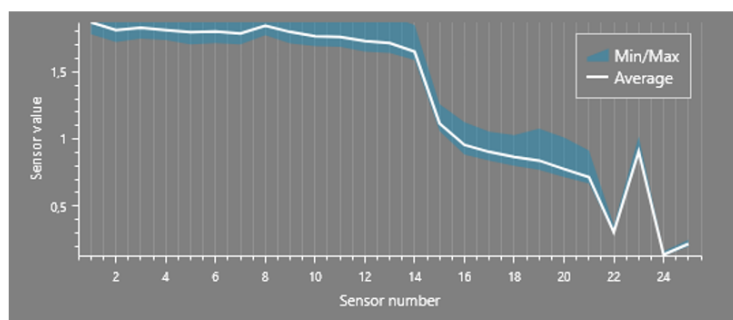
Талдау нәтижелеріне сәйкес екі параллель өлшеу жүргізілді. Бірінші үлгідегі көміртегі мөлшері 52,6354 % құрады, ал екінші үлгіде ол 54,8466% құрады. Көміртектің орташа мөлшері 53,7410% деп есептелді. Сонымен қатар, орта мәннен ауытқу 1,5636%, ал салыстырмалы орта мәннен ауытқу 2,9% болды. Төмен орта мәннен ауытқу мәні алынған нәтижелердің сенімділігін және биокөмір үлгілерінің біркелкілігін растайтын өлшемдердің жақсы қайталануын және дәйектілігін көрсетеді. 53% - дан асатын көміртегі мөлшері пиролиз процесінде жүгері собығының биомассасының айтарлықтай көмірленуі болғанын көрсетеді. Жоғары температура жағдайында ылғал, ұшпа қосылыстар және шикі биомассадағы оттегі бар функционалды топтар ыдырап, көміртегіге бай және тұрақты құрылымға әкелді. Бұл әдетте қоршаған ортаға қолданылған кезде биокөмірдің химиялық тұрақтылығы мен беріктігін

арттыруға ықпал ететін хош иісті көміртегі тізбектерінің пайда болуымен байланысты.

*Бөлшектердің өлшемін талдағыш анализі.* Биомасса үлгісіндегі бөлшектердің өлшемін және олардың таралуын анықтау үшін бөлшектердің өлшемін талдағыш анализі қолданылды. Бұл әдіс: бөлшек диаметрін ( $\mu\text{m}$ , nm), өлшемдерінің таралуын, орташа бөлшек көлемін, кейде бөлшек саны мен көлемдік үлесін анықтап береді.



а)



б)

Сурет 8. СВ600С бөлшектердің өлшемін талдағыш анализі

*Бөлшек өлшемінің таралуы.* 8а графикте СВ600С бөлшек өлшемдері көрсетілген. Негізгі максимум шамамен 1–3 мкм диапазонында орналасқан. Нәтижелер биокөмірдің көп бөлігі ұсақ, жұқа бөлінген бөлшектерден тұратынын көрсетеді. Сонымен қатар, қисықтың үлкен бөлшектер аймағына қарай біртіндеп кеңеюі үлкен бөлшектердің аз үлесінің болуын көрсетеді. Бұл пиролиз процесінде бөлшектердің жабысып іріленуіне немесе олардың ішінара қорытылуына байланысты болуы мүмкін. Дегенмен, таралуда ұсақ бөлшектер басым болғандықтан, биокөмірді тұтастай алғанда біртекті құрылымы бар жақсы ұнтақталған материал деп санауға болады. 8б графигінде өлшеу процесінде тіркелген өлшеу сигналдардың өзгеруі көрсетілген. Ақ сызық сигналдың орташа мәнін, ал көк аймақ сигналдың минималды және максималды аралығын көрсетеді. Барлық сигнал қарқындылығының біртіндеп төмендеуі бөлшектердің өлшемдері бойынша таралуының үлгісін көрсетеді. 14 және 16 сенсорлар арасында байқалған сигнал қарқындылығының айтарлықтай төмендеуі бұл аймақта ұсақ бөлшектердің басым бөлігі табылғанын көрсетеді. Өлшеу мәні 96,16% көрсетті, яғни өлшеу элементері

көп болған кезде үлкен бөлшектердің аз болуын көрсетеді. Бұл нәтижелер биокөмірдің үлгісі табиғатта әртүрлі өлшемді бөлшектерден тұратын жүйе, бірақ негізінен шағын өлшемді бөлшектерден тұратынын растайды.

**Қорытынды.** 600°C-де термиялық өңдеуден өткен жүгеріден жасалған биокөмір жоғары кеуекті, термиялық тұрақты материал болып табылады. Брунауэр-Эмметт-Теллер теориясы (БЭТ) биокөмірде өте үлкен ауданның бар екендігін, негізінен микрокеуекті материал екендігін, яғни микрокеуектердің 90% кездесетінін көрсетті, бұл биокөмірдің адсорбция қабілетіне жақсы екендігін білдіреді.

Сканерлеуші электрондық микроскоп (СЭМ) арқылы алынған мәліметтер биокөмір бетінің губка тәрізді, торлы құрылымын көрсетеді. Бұл кеуекті құрылым бет ауданының жоғары болуына және органикалық заттарды, соның ішінде микропластикті тиімді ұстай алуына мүмкіндік береді. Сонымен қатар, бет қабатының біркелкі емес және бұдырлы болуы реакциялық белсенді орталардың көп екенін көрсетіп, адсорбциялық процесс үшін артықшылық береді.

Термогравиметриялық анализ (ТГА) және дифференциалдық термиялық анализ (ДТА) нәтижелері биокөмірдің жоғары термиялық тұрақтылығын растайды. ДТА қисығында эндо- және экзотермиялық эффекттер байқалып, пиролиз процесінде биокөмірдің ароматизация және карбонизация деңгейінің жоғары екенін көрсетеді.

Инфрақызыл спектроскопиялық талдау (ИК) нәтижесінде биокөмір материалы судың жақсы сіңіру қабілетін күшейтеді және су ортасындағы ластаушы заттармен сутегі байланысының өзара әрекеттесуін жеңілдететінін, биокөмірдің көмірленуінің жоғары дәрежесінің бар екендігін көрсетті.

Элементтік көміртектің анализінің нәтижесінде адсорбция жағынан биокөмірдің жақсы нәтиже беретінін көрсетті себебі: көміртектің мөлшері жоғарылаған сайын биокөмірдің тұрақтылығы артты; гидрофобты ластағыштарды, соның ішінде микропластиктерді ұстау қабілеті жақсарды; жоғары температурада түзілген биочарда кеуектілік те көбейді.

Бөлшектердің өлшемін талдағыш биокөмірдің дамыған кеуекті құрылымға ие болатынын көрсетті. Осыған байланысты, зерттелген биокөмір адсорбция процестерінде, әсіресе судағы ластағыштарды (ауыр металдар, органикалық қосылыстар) жоюда перспективалы материал болып табылады.

Қорытындылай келе осы қасиеттер органикалық ластағыштарды, соның ішінде микропластикті суда тиімді ұстай алатын материалға айналдырады. БЭТ, СЭМ, ТГА және ИК, Элементтік көміртектің анализі, Бөлшектердің өлшемін талдағыш анализі нәтижелері биокөмірдің адсорбциялық қабілеті мен химиялық және физикалық тұрақтылығын көрсетеді, бұл оны суды тазалау және экологиялық қосымшаларда қолдануға өте қолайлы етеді.

#### Әдебиеттер тізімі

1. Schwarzenbach R.P., Escher B.I., Fenner K., Hofstetter T.B., Johnson C.A., von Gunten U., Wehrli B. The Challenge of Micropollutants in Aquatic Systems // Science. – 2006.
2. de Graaf I.E.M., van Beek R.L.P.H., Gleeson T., Moosdorf N., Schmitz O., Sutanudjaja E.H., Bierkens M.F.P. A global-scale two-layer transient groundwater model: development and application to groundwater depletion // Advances in Water Resources. – 2017. – Vol. 102. – P. 53–67. – DOI: 10.1016/j.advwatres.2017.01.011.
3. Lee J.-Y., Cha J., Ha K., Viaroli S. Microplastic pollution in groundwater: a systematic review // Environmental Pollution Bioavailability. – 2024. – Vol. 36, No. 1. – Art. 2299545. – DOI: 10.1080/26395940.2023.2299545.

4. Huang J., Chen H., Zheng Y., Yang Y., Zhang Y., Gao B. Microplastic pollution in soils and groundwater: characteristics, analytical methods and impacts // *Journal of Chemical Engineering*. – 2021. – Vol. 425. – Art. 131870. – DOI: 10.1016/j.cej.2021.131870.
5. Tammeorg P., Simojoki A., Mäkelä P., Stoddard F.L., Alakukku L., Helenius J. Biochar application to a fertile sandy clay loam in boreal conditions: effects on soil properties and yield formation of wheat, turnip rape and faba bean // *Plant and Soil*. – 2014. – Vol. 374. – P. 89–107. – DOI: 10.1007/s11104-013-1851-5.
6. Callegari A., Capodaglio A.G. Properties and beneficial uses of (bio)chars, with special attention to products from sewage sludge pyrolysis // *Resources*. – 2018. – Vol. 7, No. 1. – Art. 20. – DOI: 10.3390/resources7010020.
7. Das K.P., Chauhan P., Staudinger U., Satapathy B.K. Exploring sustainable adsorbents to mitigate micro-/nano-plastic contamination: perspectives on electrospun fibrous constructs, biochar, and aerogels // *Environmental Science: Advances*. – 2024. – Vol. 3, No. 9. – P. 1217–1243. – DOI: 10.1039/D4VA00039K.
8. Ofon U.A., Shaibu S.E., Ndubuisi-Nnaji U.U., Inam E.J., Okop I.J., Enin G.N., Offiong N.A.O., Ibuotenang N.D. Bio- and chemical surfactants for remediation of emerging organic contaminants // *Emerging Contaminants in the Terrestrial-Aquatic-Atmosphere Continuum: Occurrence, Health Risks and Mitigation*. – 2022. – P. 367–380. – DOI: 10.1016/B978-0-323-90051-5.00023-7.
9. Shaibu S.E., Effiom A.O., Essien N.S., Archibong E.S., Iboutenang N.D., Effiong A.I., Asukwo H.O., David B.A., Effiong F.I., Ekpo C., Akpabio I.F., Simon S.E., Eyo G.A. Evaluating groundwater safety: heavy metal contamination of selected boreholes across Uyo Metropolis, Akwa Ibom State, Nigeria // *UMYU Journal of Microbiology Research (UJMR)*. – 2024. – Vol. 9, No. 3. – P. 267–277. – DOI: 10.47430/ujmr.2493.033.
10. Ambroz F., Macdonald T.J., Martis V., Parkin I.P. Evaluation of the BET theory for the characterization of meso and microporous MOFs // *Small Methods*. – 2018. – Vol. 2. – Art. 1800173.
11. Claoston N., Samsuri A.W., Ahmad Husni M.H., Mohd Amran M.S. Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of empty fruit bunch and rice husk biochars // *Waste Management & Research*. – 2014. – Vol. 32. – P. 331–339. – DOI: 10.1177/0734242X14525822.
12. Nawaz A., Mishra R.K., Sabbarwal S., Kumar P. Studies of physicochemical characterization and pyrolysis behavior of low-value waste biomass using thermogravimetric analyzer: evaluation of kinetic and thermodynamic parameters // *Bioresource Technology Reports*. – 2021. – Vol. 16. – Art. 100858. – DOI: 10.1016/j.biteb.2021.100858.
13. Boiko E.A., Pachkovskii S.V. A kinetic model of thermochemical transformation of solid organic fuels // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2004. – Vol. 77, No. 9. – P. 1547–1555. – DOI: 10.1007/S11167-005-0070-0.
14. Olatunji O.O., Akinlabi S.A., Mashinini M.P., Fatoba S.O., Ajayi O.O. Thermogravimetric characterization of biomass properties: a review // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 423, No. 1. – Art. 012175. – DOI: 10.1088/1757-899X/423/1/012175.
15. Deng J., Liu Y., Liu S., Zeng G., Tan X., Huang B., Tang X., Wang S., Hua Q., Yan Z. Competitive adsorption of Pb(II), Cd(II) and Cu(II) onto chitosan-pyromellitic dianhydride modified biochar // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2018. – Vol. 506. – P. 355–364.
16. Fan Y., Wang H., Deng L., Wang Y., Kang D., Li C., Chen H. Enhanced adsorption of Pb(II) by nitrogen and phosphorus co-doped biochar derived from *Camellia oleifera* shells // *Environmental Research*. – 2020. – Vol. 191. – Art. 110030.

*Материал редакцияға 06.06.26 түсті, 20.09.26 қабылданды.*

---

**А.Т. Исмайл<sup>1</sup>, А.А. Куртебаева<sup>1</sup>, М.С. Калмаханова<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Таразский университет им. М..Х. Дулати, Тараз, Казахстан***ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОУГЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ МЕСТНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ, В ТОМ ЧИСЛЕ МИКРОПЛАСТИКА, ИЗ СТОЧНЫХ ВОД ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

**Аннотация.** В настоящее время одним из актуальных вопросов является загрязнение окружающей среды, особенно увеличение содержания опасных загрязнителей в сточных водах очистных сооружений. В этом исследовании биоуголь кукурузы (CB600C) был получен методом химической активации из сельскохозяйственных и промышленных отходов (кукурузного початка). Полное описание, проведенное такими методами, как СЭМ, TGA, Bet, FT-IR, анализ взвешенных частиц, анализ элементарного углерода, подтвердило, что он превращает стойкие органические загрязнители, включая микропластик, в материал, который может эффективно удерживать воду. Эффективность полученного материала CB600C оценивалась с использованием кукурузного биоугля для удаления загрязнителя поливинилхлорида (ПВХ) в процессе адсорбции. Полученные результаты показывают, что материал CB600C, полученный из сельскохозяйственных и промышленных отходов, имеет высокий потенциал для использования в глубокой очистке загрязненных сточных вод в качестве экологически безопасного и легкого катализатора.

**Ключевые слова:** биоуголь, поливинилхлорид, сточные воды, адсорбция.

**A.T. Ismayl<sup>1</sup>, A.A. Kurtebayeva<sup>1</sup>, M.S. Kalmakhanova<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan***INVESTIGATION OF THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF BIOCHAR OBTAINED FROM LOCAL WASTE FOR THE REMOVAL OF POLLUTANTS, INCLUDING MICROPLASTICS, FROM WASTEWATER TREATMENT PLANTS**

**Abstract.** Currently, one of the most pressing problems is environmental pollution, especially the increase in hazardous pollutants contained in wastewater from treatment plants. In this study, corn biochar (CB600C) was obtained from agricultural-industrial waste (corn cob) by chemical activation method. A detailed description carried out by methods such as Sam, TGA, bat, FT-IR, particle size analyzer analysis, elemental carbon analysis confirmed that it converts stable organic pollutants, including microplastics, into a material that can effectively retain water. The efficiency of the obtained CB600C material was evaluated using corn biochar in the removal of polyvinyl chloride (PVC) pollutant in the adsorption process. The results obtained indicate that CB600C material from agricultural-industrial waste has a high potential for use in deep treatment of contaminated wastewater as an environmentally safe, easy catalyst.

**Keywords:** biochar, polyvinyl chloride, waste water, adsorption.