

Биошикізат негізіндегі кеуекті көміртекті сорбциялық материалдар алу және физика-химиялық қасиеттерін зерттеу

А.Р. Керимкулова^{1,2}, Е.Ж. Ермолданов^{1,3*}, Н.М. Асанбек^{1,3}, М.К. Атаманов¹,
А.Н. Жумағалиева^{1,6}, Г.Р. Нысанбаева⁴, Т.С. Атаманова⁵, А.Н. Сабитов^{1,5},
Е.О. Досжанов^{1,3}, Ж.М. Жандосов¹

¹Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к., 172, Алматы, Қазақстан

²Satbayev University, Сәтбаев к., 22а, Алматы, Қазақстан

³Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даң., 71, Алматы, Қазақстан

⁴Азаматтық авиация академиясы, Закарпатская к., 44, Алматы, Қазақстан

⁵Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Гоголь к., 114/8, Алматы, Қазақстан

⁶Назарбаев университеті, Қабанбай батыр даң., 53, Астана, Қазақстан

ARTICLE INFO

Алынған
19.02.2026

Түзетілген түрде алынды
13.03.2026

Қабылданды
30.03.2026

Түйін сөздер:

кеуекті құрылым;
белсендірілген көмір;
химиялық белсендіру;
сорбция; биошикізат

АҢДАТПА

Жұмыста ауыл шаруашылығының лигноцеллюлоза қалдықтары негізінде жоғары тиімді кеуекті көміртекті сорбциялық материалдарды алу тәсілі әзірленді және олардың физика-химиялық қасиеттеріне кешенді бағалау жүргізілді. Бастапқы шикізат ретінде күріш қабығы (КҚ), жаңғақ қабығы (ЖҚ), бидай сабаны (БС) және қарағай үгіндісі (ҚҮ) қолданылады. Алынған карбонизаттар белсендіруші агент пен көміртегі матрицасының әртүрлі массалық қатынастарында калий гидроксидімен химиялық белсендіруден өтті. Сорбенттердің беттік-химиялық белсенділігін арттыру КОН көмегімен жүзеге асырылды. Синтезделген материалдардың беткі морфологиясы мен элементтік құрамы сканерлеуші электронды микроскопия және энергия дисперсиясын талдау әдістерімен, ал функционалдық топтар Фурье түрлендіретін инфрақызыл спектроскопияны (FTIR) қолдану арқылы зерттелді. Белсендіру дәрежесінің жоғарылауы микро, мезо және макропоралардың пайда болуымен иерархиялық кеуекті құрылымның дамуына, сондай-ақ көміртегі материалдарының бетіндегі оттегі мен азот бар функционалдық топтардың көбеюіне әкелетіні анықталды. Ең үлкен микрокеуектілікке КОН:көміртегі 1:4 массалық қатынасында қол жеткізілді. Қалыптасқан функционалдық құрылым әртүрлі табиғаттағы улы ластаушы заттарға қатысты материалдардың сорбциялық қабілетін арттыруға ықпал етеді. Нәтижелер синтезделген көміртекті сорбенттерді ауа мен су ортасын тазарту үшін экологиялық қауіпсіз және экономикалық тұрғыдан тиімді материалдар ретінде пайдалану белсенділігін растайды.

1. Кіріспе

Қоршаған ортаға түсетін техногендік жүктеменің артуы және ауаның ластануымен байланысты төтенше жағдайлар санының көбеюі газ-ауа қоспаларын улы заттардан тазартудың тиімді, үнемді және экологиялық қауіпсіз шешімдерін іздеуді ерекше өзекті етеді. Осы тұрғыда адсорбциялық тазарту әдістері қарапайымдылығы, әмбебаптығы және жоғары тиімділігі арқасында кең қолданыс табауда.

Қазіргі ғылыми зерттеулердің перспективті бағыттарының бірі – жаңартылатын шикізат көздеріне негізделген биоадсорбенттерді, атап айтқанда агроөнеркәсіп кешенінің қалдықтарын пайдалану болып табылады [1-3]. Лигноцеллюлозды өсімдік қалдықтары (жаңғақ қабықтары, күріш қауызы, бидай сабаны, ағаш үгінділері және т.б.) тиісті карбонизация және белсендіру процестерінен кейін дамыған кеуекті құрылымға және жоғары адсорбциялық қасиеттерге ие көміртекті материалдарға айналуы мүмкін. Мұн-

*Corresponding author: Ye.Zh. Yermoldanov; E-mail address: eursultanermoldanov@gmail.com

дай сорбенттер азаматтық қорғаныс, өрт қауіпсіздігі және ауа тазарту жүйелерінде қолданылатын сүзгілер үшін перспективті материалдар болып саналады [4].

Биосорбенттерді қолдану ұлы газдар мен ұшқыш органикалық қосылыстарды (VOC), аммиак (NH_3), формальдегид және басқа да қауіпті заттарды тиімді жоюмен қатар, ауыл шаруашылығы қалдықтарын кәдеге жарату мәселесін шешуге мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде тұрақты даму, экологиялық қауіпсіздік және айналмалы экономика қағидаттарына толық сәйкес келеді [5, 6].

Дәстүрлі сорбенттер – белсендірілген көмір мен синтетикалық цеолиттер – жоғары тиімділік көрсеткенімен, олардың өндірісі мен регенерациясы көбінесе жоғары энергия шығындарын талап етеді және экологиялық тұрғыдан қолайсыз болуы мүмкін [7, 8]. Осыған байланысты төмен шығындармен жоғары сорбциялық белсенділікті қамтамасыз ететін жаңартылатын өсімдік материалдары негізіндегі көміртекті биоадсорбенттерді әзірлеу ерекше қызығушылық тудырады [9, 10].

Жержаңғақ қабықтары, күріш қауызы, өрік дәндері, ағаш үгінділері сияқты ауыл шаруашылығы қалдықтары тиісті химиялық немесе термохимиялық өңдеуден кейін ұшқыш органикалық қосылыстарды, аммиак және басқа да ұлы компоненттерді адсорбциялау үшін айтарлықтай әлеует көрсетеді [11, 12]. Бұл материалдардың тиімділігі олардың бастапқы лигноцеллюлозды құрылымына, сондай-ақ белсендіру кезінде түзілетін микрокеуектер мен функционалдық топтардың сипатына байланысты.

Әдеби деректерге сәйкес, өсімдік текті материалдарды термиялық және химиялық өңдеу олардың бетінде оттегі бар функционалдық топтардың (гидроксил, карбоксил) санын арттыруға мүмкіндік береді, бұл ауыр металл иондары мен органикалық ластаушы заттардың адсорбциясын едәуір күшейтеді [13, 14]. Мысалы, қарағай қабықтары мен ағаш үгінділерін термохимиялық өңдеу нәтижесінде мыс иондарына қатысты сорбциялық қабілеттің 12 мг/г дейін артуы көрсетілген [4]. Сонымен қатар, динамикалық сынақтар мұндай сорбенттердің жоғары регенерациялану қабілетіне ие екенін дәлелдейді [13].

Алайда, жүргізілген зерттеулер санының артуына қарамастан, биоадсорбенттерді белсендіру параметрлерін (температура, химиялық реагенттер, өңдеу уақыты) оңтайландыруға, олардың кеуекті құрылымының қалыптасу механизмдерін анықтауға және нақты жұмыс жағдайларындағы ұзақ мерзімді тұрақтылығын бағалауға қатысты

бірқатар мәселелер жеткілікті түрде зерттелмеген [7, 15, 16].

Осыған байланысты, лигноцеллюлозды биоқалдықтар негізінде алынған көміртекті сорбенттердің құрылымдық-текстуралық қасиеттерін, элементтік және функционалдық құрамын, сондай-ақ олардың ұшқыш органикалық қосылыстарды адсорбциялау қабілетін жүйелі түрде зерттеу өзекті ғылыми және қолданбалы міндет болып табылады.

Бұл жұмыста лигноцеллюлозды ауылшаруашылық қалдықтарының қалдықтары – жаңғақ қабығы, күріш қабығы, бидай сабаны және қарағай жоңқалары шикізат ретінде таңдалды. Аталған биошикізат түрлерінің таңдалуы олардың төмен құнына, кең қолжетімділігіне және термохимиялық өңдеуден кейінгі қолайлы физика-химиялық қасиеттеріне байланысты.

Жұмыстың мақсаты – аталған биошикізаттар негізінде көміртекті сорбенттерді карбонизация және КОН арқылы әртүрлі массалық қатынастарда химиялық белсендіріп синтездеу, сондай-ақ олардың құрылымдық-текстуралық және физика-химиялық қасиеттерін, сорбциялық қабілетін жүйелі түрде зерттеу.

2. Зерттеу шарттары мен әдістері

Кеуекті көміртекті наносорбенттерді алу үшін негізгі шикізат ретінде Алматы облысында жиналған бидай сабаны (БС), қарағай үгінділері (ҚҮ), күріш қауызы (КҚ) және Алматы қаласының Медеу ауданында жиналған жаңғақ қабықтары (ЖҚ) пайдаланылды. Бастапқы биошикізат түрлері 1-суретте көрсетілген.

Жаңғақ қабықтары лигнин мөлшерінің жоғары болуымен, механикалық беріктігімен және карбонизациядан кейін тұрақты көміртекті қаңқаның қалыптасуымен сипатталады, бұл оларды ұзақ мерзімді қолдануға жарамды сорбенттер алуға мүмкіндік береді. Күріш қауызы кремний диоксидіне бай және лигноцеллюлозалық құрылымға ие, ал термиялық өңдеуден кейін дамыған микрокеуекті құрылым мен жоғары белсенді бет түзеді, бұл оны ауыр металдар мен органикалық ластаушы заттарды адсорбциялау үшін перспективті етеді. Бидай сабаны целлюлоза мен гемицеллюлозаға бай, көміртектену барысында көптеген белсенді орталықтары бар көміртекті матрица түзеді және күлділігінің төмендігімен ерекшеленеді. Қарағай үгінділері целлюлоза мен лигниннің жоғары мөлшеріне байланысты оңай термохимиялық түрлендіріледі және отте-



Сурет 1. Ауылшаруашылық лигноцеллюлозалық қалдықтар.

гіқұрамды функционалдық топтарға бай кеуекті құрылымның қалыптасуына ықпал етеді. Осылайша, таңдалған биоқалдықтар экономикалық тиімділікті, экологиялық тұрақтылықты және технологиялық жарамдылықты үйлестіреді.

Бастапқы биошикізаттарды карбонизациялау процесі температураны бақылауға арналған термопарамен жабдықталған тік шахталы пешке орналастырылған тығыздалған болат ребел. орда жүргізілді (2-сурет). Алынған үлгі массасы 300 г. Бұл карбонизацияға ұшырайтын материалдың және ребел. ордың көлемін ескере отырып алынды. Карбонизация инертті атмосферада 650 °C (қыздыру жылдамдығы 5 °C/мин) температурада 90 мин бойы жүзеге асырылды. Таңдалған температура режимі ұшпа компоненттердің жойылуын қамтамасыз етіп, көміртекті материалдың бастапқы кеуекті қаңқасын қалыптастыру үшін оңтайлы болып табылады.

Карбонизациядан кейін үлгілер оттегінің қолжетімділігін болдырмайтын ортада бөлме температурасына дейін біртіндеп салқындатылды, бұл көміртекті материалдың өздігінен тотығуын болдырды. Алынған көміртекті материалдар қалдық қоспаларды кетіру мақсатында дистилденген сумен жуылып, кейін 70 °C температурада тұрақты массаға дейін кептірілді. Жуу процесі шайынды су мөлдір болғанға дейін жүргізілді.

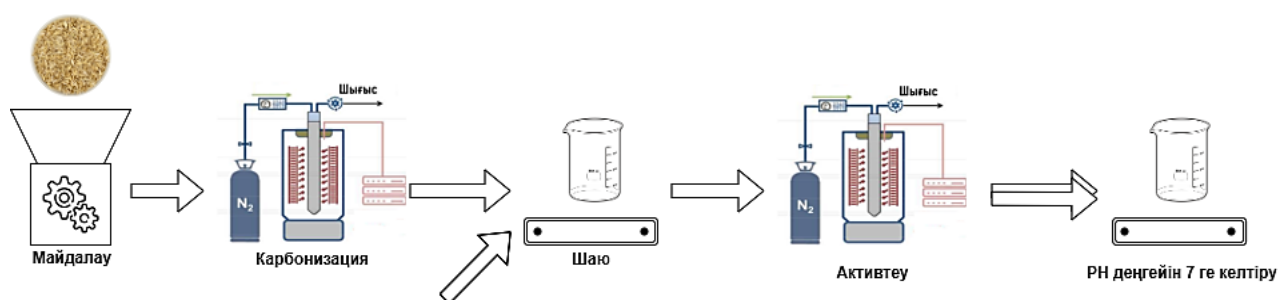
Химиялық белсендіру калий гидроксидін (KOH) қолдану арқылы жүзеге асырылды. Бел-

сендіру алдында көміртекті материал KOH-пен мұқият араластырылып, KOH:көміртек массалық қатынастары 1:2 және 1:4 жағдайында дайындалды. Алынған қоспа реагенттің біркелкі таралуын қамтамасыз ету үшін 70 °C температурада шамамен 12 сағат бойы кептірілді.

Белсендіру процесі азот (N₂ ағын жылдамдығы 250 мл/мин) атмосферасында тік құбырлы пеште 800 °C температурада 90 мин жүргізілді (қыздыру жылдамдығы 5 °C/мин). Бұл температура KOH пен көміртекті матрица арасындағы реакцияларды күшейтіп, микрокеуектіліктің қарқынды дамуына және мезо- және макрокеуектердің түзілуіне ықпал етті. Белсендіру аяқталғаннан кейін үлгілер азот атмосферасында бөлме температурасына дейін салқындатылды.

Алынған белсендірілген көмір материалдары қалдық сілтіні толық жою үшін дистилденген сумен жуылып, шайынды судың рН мәні бейтарап (рН ≈ 7) болғанға дейін өңделді. Соңында үлгілер 105 °C температурада тұрақты массаға дейін кептірілді. Ұсынылған белсендіру режимі көміртекті сорбенттердің меншікті бетінің ұлғаюын және дамыған кеуекті құрылымның қалыптасуын қамтамасыз етеді. Бар процесс кемінде 3 рет қайталанды.

Көміртекті сорбенттердің беттік және құрылымдық ерешеліктерін энергия-дисперсиялық микроталдау жүйесімен жабдықталған Quanta 3D 200i Dual System микроскопында жүр-



Сурет 2. Көміртекті сорбенттерді алу сұлбасы: карбонизация және химиялық белсендіру сатылары.

гізілді. Үлгілердің химиялық белсендіруге дейінгі және кейінгі элементтік құрамы SEM жүйесіне біріктірілген JED-2300 EDS энергия-дисперсиялық спектрометрі (Жапония) көмегімен анықталды.

Үлгілердің инфрақызыл спектрлері Spectrum 65, Perkin & Elmer 1100 FTIR спектрометрінің көмегімен 4000-400 cm^{-1} диапазонында 1 cm^{-1} ажыратымдылығы бар KBr түйіршіктерін пайдаланып жазылды. Инфрақызыл зерттеулерге арналған көміртекті сорбент осы үлгіні KBr кристалдарымен араластырып басу арқылы алынды [17].

Көміртекті сорбенттердің кеуектілігі BET-сорбтометрия әдісімен анықталды. Азотты адсорбциялау-десорбциялау процесі -196 °C температурада «Сорбтометр-М» анализаторын қолдану арқылы жүзеге асырылды.

Алынған көміртекті сорбенттердің сорбциялық қасиеттері ұшқыш органикалық қосылыстардың моделін көрсететін циклогександы қолдану арқылы бағаланды. Циклогексан полярысыз және молекулалық мөлшері кішкентай, сондықтан оның сорбенттермен өзара әрекеттесуі негізінен дисперсиялық күштер арқылы жүреді, бұл әсіресе микропорлардың рөлін бағалауға мүмкіндік береді. Динамикалық сорбциялық қисықтар MixSorb аппараты көмегімен сорбенттің қанығуына дейін алынған, олардың интеграциясы арқылы материалдардың сорбциялық сыйымдылығы есептелді.

3. Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

Алынған көміртекті сорбенттердің морфологиялық және құрылымдық ерекшеліктерін зерттеу үшін сканерлеуші электронды микроскопия (Scanning Electron Microscopy, SEM) әдісі қолданылды. SEM – материал бетінің микрон және нанометр деңгейіндегі рельефін жоғары айырымдылықпен бейнелеуге мүмкіндік беретін заманауи талдау тәсілі болып табылады және кеуекті құрылымның геометриясын, кеуектердің пішіні мен таралуын визуалды бағалауда кеңінен пайдаланылады. Бұл әдіс арқылы алынған микросуреттер көміртекті материалдардың белсендіру нәтижесінде қалыптасқан құрылымдық өзгерістерін нақты көрсетуге мүмкіндік береді.

3-6 суреттерде күріш қауызы (КҚ), бидай сабаны (БС) және жаңғақ қабығы (ЖҚ) негізінде синтезделген көміртекті сорбенттердің беткі морфологиясы көрсетілген. Кеуектілік құрылым деп қатты дененің ішінде әртүрлі өлшемдегі бос кеңістіктердің (микрокеуектер – диаметрі 2 нм-ге дейін, мезокеуектер – 2-50 нм, макрокеуектер

– 50 нм-ден жоғары) жүйесін айтады, олар сорбциялық процестердің негізгі белсенді аймақтары болып табылады.

Күріш қауызынан алынған және КОН:көміртек массалық қатынасы 1:2 болған жағдайда белсендірілген үлгіде салыстырмалы түрде біркелкі таралған микрокеуекті құрылым мен ұсақ капиллярлы арналары байқалады (3-сурет а). Мұндай құрылым белсендіру процесінің орташа қарқындылығын сипаттайды және көміртекті матрицаның бастапқы қаңқасы едәуір дәрежеде сақталғанын көрсетеді. Микрокеуектердің басым болуы сорбенттің меншікті бетінің ұлғаюына және молекулалық деңгейдегі адсорбция үшін қолайлы жағдайдың қалыптасуына ықпал етеді. Ал КОН мөлшері арттырылып, массалық қатынас 1:4 болған жағдайда көміртекті құрылымның айқын қопсытылуы, ірі макрокеуектердің түзілуі және крекинг аймақтарының пайда болуы байқалады (3-сурет ә). Қопсытылу деп көміртекті қаңқаның химиялық реакциялар нәтижесінде ішінара бұзылып, ішкі бос кеңістіктің ұлғаюын айтады. Бұл құбылыс калий гидроксидінің көміртекпен жоғары температурада әрекеттесуі барысында газ тәрізді өнімдердің бөлінуі және көміртек қабаттарының қайта ұйымдасуымен түсіндіріледі. Нәтижесінде көпдеңгейлі, өзара байланысқан кеуекті жүйе қалыптасып, сорбенттің ішкі беті айтарлықтай артады.

Жүргізілген SEM зерттеулері химиялық белсендіру шарттарын оңтайландыру арқылы көміртекті сорбенттердің құрылымдық-текстуралық қасиеттерін мақсатты түрде өзгертуге болатынын, ал белс.атор үлесінің артуы дамыған микро-, мезо- және макрокеуектер жүйесінің түзілуіне ықпал ететінін анықтады.

Қарағай үгінділері (ҚҮ) негізінде алынған көміртекті сорбенттердің морфологиялық ерекшеліктері сканерлеуші электронды микроскопия (SEM) әдісі арқылы егжей-тегжейлі зерттелді. SEM – материал бетінің микрожәне наноқұрылымын жоғары дәлдікпен бейнелейтін әдіс болып табылады және кеуекті жүйенің кеңістіктік ұйымдасуын, кеуектердің пішінін, бағытталуын және өзара байланысын бағалауға мүмкіндік береді.

Қарағай үгінділері негізіндегі және КОН:көміртек массалық қатынасы 1:2 болған жағдайда белсендірілген үлгілерде микрокеуектіліктің басым дамуы байқалады (4-сурет а). Кеуектер негізінен өсімдік талшықтарының бастапқы анатомиялық құрылымы бойымен бағытталып, ұзынша канал тәрізді формада қалыптасқан. Мұндай бағытталған кеуектілік көміртекті матрицаның табиғи

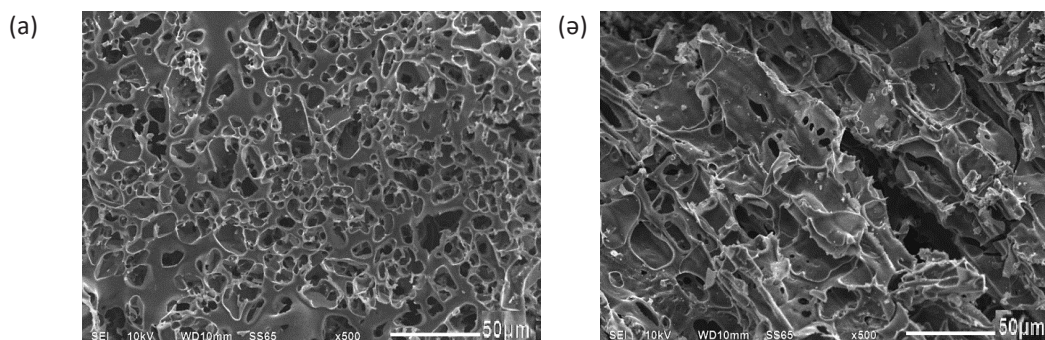
талшықты морфологиясының сақталғанын және белсендіру процесінің салыстырмалы түрде жұмсақ режимде өткенін көрсетеді. Бұл құрылым микрокеуектердің біркелкі таралуымен сипатталып, сорбенттің меншікті бетін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді, соның нәтижесінде төмен молекулалы ластаушы заттардың тиімді адсорбциясы қамтамасыз етіледі. Ал калий гидроксидінің мөлшері арттырылып, массалық қатынас 1:4 болған жағдайда құрылымның айқын қопсылуы және бастапқы талшықты элементтердің ішінара бұзылуы байқалады (4-сурет ә). Қопсылу процесі көміртекті матрица мен белс.атор арасындағы термохимиялық реакциялар нәтижесінде көміртек қабаттарының ажырауы мен газ тәрізді өнімдердің бөлінуімен түсіндіріледі. Бұл құбылыс ішкі көлемнің ұлғаюына және жаңа кеуектердің түзілуіне әкеледі. Нәтижесінде микрокеуектермен қатар мезо- және макрокеуектер қалыптасып, олардың арасын байланыстыратын кеңейтілген каналдар жүйесі түзіледі. Мұндай көпдеңгейлі кеуекті құрылым сорбент бетінің қолжетімділігін арттырып, массалық тасымалды жеңілдетеді.

Осылайша, SEM талдауы калий гидроксидімен белсендіру дәрежесін өзгерту арқылы қарағай үгінділері негізіндегі көміртекті сорбенттердің

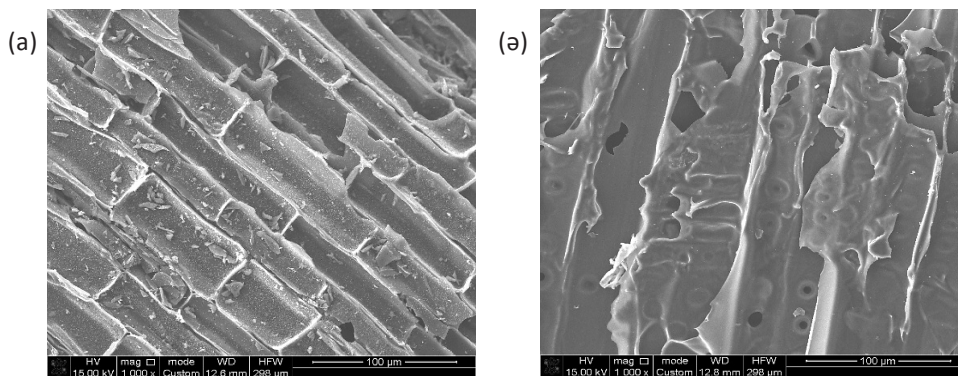
морфологиясын мақсатты басқаруға болатынын және белс.атор мөлшерінің артуы ішкі беттің едәуір ұлғаюына және дамыған кеуекті жүйенің қалыптасуына алып келетінін дәлелдейді.

Бидай сабанынан алынған көміртекті сорбенттердің морфологиялық және текстуралық қасиеттері SEM әдісі арқылы зерттелді, ол кеуектердің пішіні, өлшемі, таралуы және өзара байланысы туралы нақты ақпарат береді. Кеуектілік құрылым микрокеуектер (≤ 2 нм), мезокеуектер (2-50 нм) және макрокеуектер (≥ 50 нм) түрінде бөлініп, сорбция процесінің негізгі белсенді орталықтарын қамтамасыз етеді.

КОН:көміртек массалық қатынасы 1:2 болғанда белсендірілген үлгілерде микрокеуектілік басым болып, бастапқы өсімдік құрылымы едәуір сақталып, сорбенттің беткі ауданын ұлғайтып, ұсақ молекулалы ластаушыларды тиімді адсорбциялауға мүмкіндік береді (5-сурет а). Ал қатынас 1:4 болғанда (5-сурет ә) көпдеңгейлі микро-мезо-макрокеуекті құрылым қалыптасып, адсорбат молекулаларының терең енуі мен массалық тасымалды жақсартады. Бұл өзгерістер КОН пен көміртек арасындағы термохимиялық өзара әрекеттесудің күшеюінен туындап, жаңа кеуектер түзілуіне және ішкі беттің айтарлықтай ұлғаюына әкеледі.



Сурет 3. Күріш қауызы (КҚ) негізіндегі көміртекті сорбенттердің SEM микросуреттері: 1:2 (а) және 1:4 (ә) қатынасында КОН-пен белсендірілген.



Сурет 4. Қарағай үгінділері (ҚҮ) негізіндегі көміртекті сорбенттердің SEM микросуреттері: 1:2 (а) және 1:4 (ә) қатынасында КОН-пен белсендірілген.

Қорыта келе, белсендіру дәрежесін арттыру бидай сабаны негізіндегі көміртекті сорбенттердің кеуектілік құрылымын тиімді микро-, мезо-, макрокеуекті құрылымдарға түрлендіруге мүмкіндік береді.

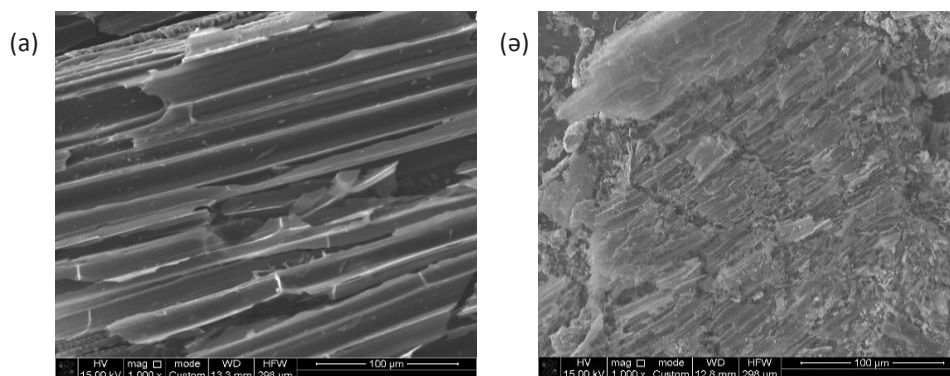
Жаңғақ қабығы негізіндегі үлгілер КОН:көміртек массалық қатынасы 1:2 болған жағдайда салыстырмалы түрде тығыз және біркелкі реттелген құрылымымен ерекшеленеді (б-сурет а). Мұндай құрылым бастапқы биомассаның морфологиялық ерекшеліктерін едәуір сақтап, негізінен микрокеуектілікке ие болып, адсорбциялық белсенді орталықтардың тиімді орналасуын қамтамасыз етеді. Қатынас 1:4 болған жағдайда (б-сурет ә) химиялық белсендірілген үлгілер ірі дисперсті сипатқа ие болып, кең макрокеуектер мен беткі эрозия аймақтары түзіледі. Бұл құрылымдық өзгерістер жасуша қабырғаларының ішінара бұзылуымен, ішкі бет ауданның айтарлықтай ұлғаюымен және мезо- мен макрокеуектердің дамуы нәтижесінде пайда болады. Нәтижесінде сорбенттің адсорбциялық қабілеті жоғарылап, молекулалардың материалға терең енуі мен массалық тасымал процестері жақсарады.

Жалпы, SEM талдауы КОН мөлшерінің артуы

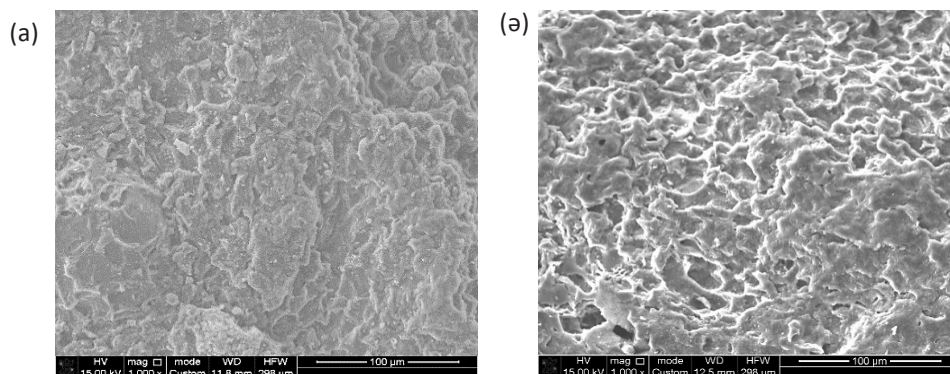
микрокеуекті құрылымнан мезо- және макрокеуекті текстураларға өтуді қамтамасыз ететінін көрсетті, бұл сорбенттердің меншікті бетінің ұлғаюына және адсорбциялық белсенділігінің артуына тікелей әсер етеді.

Химиялық өңдеудің элементтік құрамға әсері 1-кестеде көрсетілген. Карбонизация және белсендіру процестері нәтижесінде көміртектің массалық үлесі бастапқы 59-62% деңгейінен 85-91% диапазонына дейін артатыны байқалады, ал оттегі мен басқа ұшпа элементтердің мөлшері айтарлықтай төмендейді. Бұл алынған көміртекті материалдардың жоғары тазалығы мен құрылымдық тұрақтылығын сипаттайды, сондай-ақ олардың сорбциялық белсенділігін арттыруға қолайлы екендігін көрсетеді.

Белсендірілген көмір үлгілерінің бетінде қалыптасқан функционалдық топтарды талдау үшін Фурье түрлендірулі инфрақызыл (FTIR) спектроскопиясы қолданылды. Өртүрлі биомассадан алынған сорбенттердің FTIR спектрлері 7-суретте ұсынылған. Бұл спектрлер материал бетінде өртүрлі функционалдық топтардың болуын айқын көрсетеді және олардың химиялық белсенділік сипаттамаларын бағалауға мүмкіндік береді.



Сурет 5. БС негізіндегі көміртекті сорбенттердің SEM микросуреттері: 1:2 (а) және 1:4 (ә) қатынасында КОН-пен белсендірілген.



Сурет 6. ЖҚ негізіндегі көміртекті сорбенттердің SEM микросуреттері: 1:2 (а) және 1:4 (ә) қатынасында КОН-пен белсендірілген.

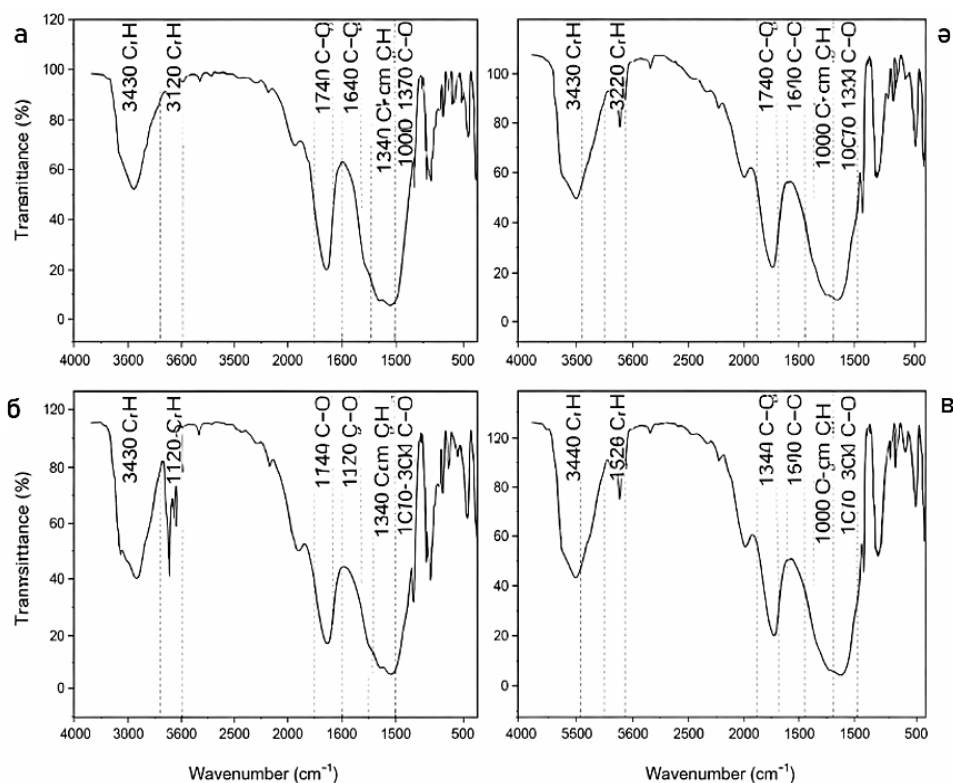
3430-3450 cm^{-1} диапазонында байқалатын кең жолақтар гидроксил топтарының (-OH) болуын көрсетеді, ал 3120-3200 cm^{-1} аймағындағы сигналдар C-H созылу тербелістеріне сәйкес келеді. 1720-1740 cm^{-1} аймағындағы шыңдар карбонил топтарының (C=O) бар екендігін дәлелдейді, ал 1640-1650 cm^{-1} жолақтар ароматты C=C байланыстарына тән. 1000-1300 cm^{-1} диапазонында эфир және спирт топтарына (C-O) сәйкес келетін жолақтар байқалады.

Оттекті функционалдық топтардың болуы сорбенттердің полярлығын қамтамасыз етеді, ал C-H және C=C топтарының қатысуы органикалық лақтаушы заттарды тиімді адсорбциялау қабілетін арттырады.

Жұмыстың келесі кезеңінде карбонизацияланған және белсендірілген материалдар талдауға дайындалды. Талдау алдында барлық үлгілер 120 °C температурада 17 сағат бойы дегаздандырылды. Сабан, қарағай үгінділері және жаңғақ үлгілерінің азот адсорбциясы изотермалары ұқсас профильге ие болып, қиылыспайды, бұл олардың адсорбциялық қабілетінің салыстырмалы түрде төмен екенін көрсетеді. Мұндай изотермалар микрокеуекті материалдарға тән сипат болып саналады. Алайда күріш қабығы үлгісінің изотермасы микромезокеуекті сипатқа ие, бұл ең үлкен жалпы кеуек көлеміне қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Кесте 1. Белсендірілген көмір үлгілерінің элементтік құрамы (EDS деректері, массалық үлесі, %)

Элементтер %	КҚ	ЖҚ	ҚҰ	БС	КҚ белс.	ЖҚ белс.	ҚҰ белс.	БС белс.	Стандартты ауытқу(±)
C	58,90	62,07	62,16	60,87	84,43	91,07	91,54	86,58	0,01
O	36,47	35,51	34,67	35,57	12,65	7,85	8,46	11,35	0,01
Na	1,59	–	1,54	2,35	0,89	–	–	1,02	0,01
Si	1,97	0,73	–	–	0,85	0,33	–	–	0,01
K	–	0,17	0,92	–	–	0,48	–	–	0,01
P	1,07	0,66	–	1,21	1,17	–	–	1,05	0,01
Fe	–	0,58	0,71	–	–	0,28	–	–	0,01



Сурет 7. Белсендірілген көмір үлгілерінің FTIR спектрлері: (а) КҚ; (ә) ЖҚ; (б) ҚҰ; (в) БС.

Азот адсорбциясының изотермалары 8-суретте көрсетіліп, сорбенттердің кеуектілік құрылымын және адсорбциялық қасиеттерін бағалауға мүмкіндік береді.

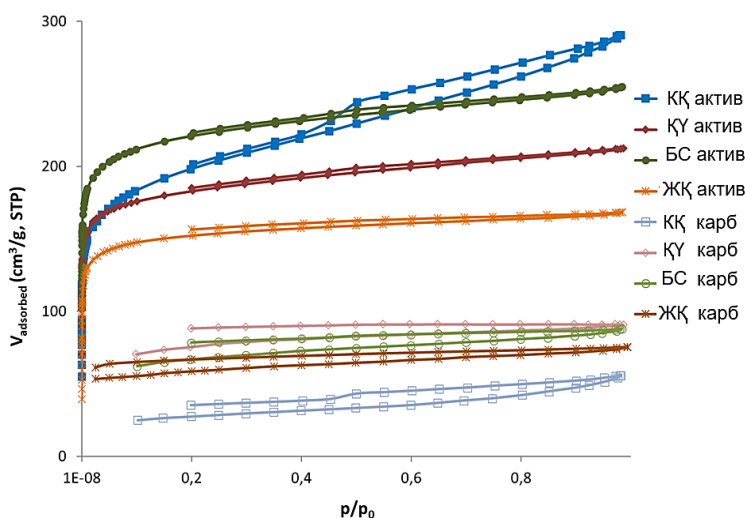
Карбонизацияланған үлгілер нашар дамыған кеуекті құрылыммен сипатталса, химиялық белсендірілген үлгілерде айқын микрокеуекті немесе мезомезокеуекті құрылымын қалыптастырады. Күріш қауызы негізіндегі сорбент ең жоғары жалпы кеуек көлемін көрсетті.

Азот изотермалары негізінде есептелген текстуралық параметрлер 2-кестеде келтірілген. Бидай сабаны микрокеуектер көлемі бойынша, ал күріш қауызы жалпы және мезокеуек көлемі бойынша алдыңғы орын алады.

Соңғы 5-10 жылдағы әдеби деректерді талдау бойынша күріш қауызы, бидай сабаны, жаңғақ қабығы және қарағай үгіндісінен алынған активтелген көмірлер үшін меншікті бет ауданы ($S_{\text{БЕТ}}$) әдетте 1300-2800 м²/г аралығында болады, ал осы жұмыста алынған мән 854 м²/г, яғни $S_{\text{БЕТ}}$ бойынша нәтижелер әдебиеттегі ең жоғары көрсеткіштер-

ден төмен [18, 19]. Дегенмен, автор анықтаған сорбциялық сыйымдылық 1,829 мл/г көптеген жарияланған мәндермен (көбіне шамамен 0,8-1,5 мл/г) салыстырғанда деңгейлес немесе жоғары, бұл алынған сорбенттердің практикалық сыйымдылығы жақсы екенін көрсетеді. Осылайша, зерттелген материалдар меншікті бет ауданы жағынан кейбір әдеби үлгілерден төмен болғанымен, нақты адсорбциялық қасиеттері бойынша бәсекеге қабілетті, бұл олардың кеуек құрылымының ерекшеліктерімен және белсендіру әдісінің айырмашылықтарымен түсіндірілуі мүмкін.

Циклогексанның сорбциясын зерттеу модельдік жүйе ретінде таңдалды, себебі ол ұшқыш органикалық қосылыстардың (VOC) кең тобына тән негізгі физика-химиялық қасиеттерді көрсетеді. Циклогексан полярсыз, салыстырмалы түрде шағын молекула болып табылады және айқын функционалдық топтарға ие емес, сондықтан оның көміртекті сорбенттермен өзара әрекеттесуі негізінен дисперсиялық және ван-дер-Ваальс күштері арқылы жүзеге асады. Бұл қасиет ци-



Сурет 8. Белсендірілген көмір үлгілерінің 196 °C температурадағы азот адсорбция-десорбция изотермалары.

Кесте 2. Белсендірілген көмір үлгілерінің элементтік құрамы (EDS деректері, массалық үлесі, %)

Үлгі	$S_{\text{БЕТ}}$, м ² /г	$V_{\text{жалпы}}$, см ³ /г	$V_{\text{микро}}$, см ³ /г	$V_{\text{мезо}}$, см ³ /г	Құрылымдық сипаттама	Стандартты ауытқу (\pm)
BC (бел.)	854	0,394	0,317	0,077	Жоғары микрокеуектілік	0,001
KQ (бел.)	738	0,449	0,266	0,183	Микро-мезокеуекті құрылым	0,001
KY (бел.)	711	0,328	0,266	0,062	Орташа дамыған кеуектілік	0,001
JK (бел.)	597	0,260	0,234	0,026	Тығыз құрылым, мезокеуек аз	0,001

клогександы көміртекті материалдардың кеуекті құрылымының әсерін, әсіресе микрокеуектердің рөлін бағалау үшін қолайлы модельдік адсорбат етеді. Циклогексан сорбциясының нәтижелері 3-кестеде келтірілген.

Бұл MixSorb көмегімен өлшенген серпінді уақыт қисықтарын (яғни сорбенттің қанығу уақыты) интегралдағаннан кейін алынған циклогександы ұстау қабілетінің мәндері. Мәндер микрокеуектер көлемдерімен бірдей трендке сәйкес келеді. Бұл циклогексанның микрокеуектерде басым адсорбциялануымен байланысты. Жаңғақ негізіндегі материалдың есептелген сыйымдылығы күтілгеннен төмен екенін атап өткен жөн. Бұл циклогексанға қол жеткізуді қиындататын азырақ тармақталған кеуек құрылымына байланысты болуы мүмкін. Сонымен қатар, белсендірілген күріш қауызының циклогексанға сіңіру қабілеті мезокеуекті құрылымның болуына байланысты болуы мүмкін, бұл органикалық қосылыстардың таңдаулы сорбция орындарына жетуінің арттыруы мүмкін.

4. Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде ауылшаруашылық лигноцеллюлозалық қалдықтар – күріш қауызы, бидай сабаны, қарағай үгінділері және жаңғақ қабығы негізінде көміртекті сорбенттерді алу мүмкіндігі және олардың құрылымдық-физика-химиялық қасиеттері кешенді түрде зерттелді. Көміртекті материалдарды 650 °C температурада карбонизациялау және кейіннен KOH көмегімен 800 °C температурада химиялық белсендіру тиімді кеуекті құрылымның қалыптасуына алып келетіні анықталды.

SEM талдауы калий гидроксидінің мөлшерін арттыру (KOH:көміртек = 1:4) барлық зерттелген үлгілер үшін микрокеуекті құрылымнан мезо- және макрокеуекті текстураларға өтуді қамтамасыз ететінін көрсетті. Бұл үрдіс сорбенттердің меншікті бетінің айтарлықтай ұлғаюымен қатар жүреді. Азот адсорбциясы нәтижесінде бидай са-

баны негізіндегі белсендірілген көмірдің $S_{\text{бет}}$ мәні 854 м²/г, ал күріш қауызы негізіндегі сорбенттің жалпы кеуек көлемі 0,449 см³/г екені анықталды, бұл алынған материалдардың дамыған кеуекті құрылымға ие екенін дәлелдейді.

EDS және FTIR талдаулары белсендіру процесінен кейін көміртек үлесінің 59-62% деңгейінен 85-91% дейін артқанын, сондай-ақ сорбент бетінде гидроксил, карбонил, эфир және ароматты функционалдық топтардың қалыптасқанын көрсетті. Бұл топтар көміртекті материалдардың химиялық белсенділігін арттырып, полярлы және органикалық ластаушы заттардың адсорбциясына қолайлы жағдай жасайды.

Циклогександы модельдік адсорбат ретінде қолдану көміртекті сорбенттердің кеуекті құрылымы мен сорбциялық қасиеттері арасындағы байланысты айқын көрсетуге мүмкіндік берді. Бидай сабаны негізіндегі белсендірілген көмір ең жоғары сорбциялық қабілет көрсетті (1,829 мл циклогексан/г), бұл оның микрокеуектер көлемінің жоғары болуымен және кеуек торының жақсы тармақталғандығымен түсіндіріледі. Күріш қауызы негізіндегі сорбенттің салыстырмалы түрде жоғары сорбциялық қабілеті (1,500 мл/г) мезокеуектердің болуы арқылы массалық тасымалдың жақсаруымен байланысты. Ал жаңғақ қабығы негізіндегі материалдың төмен сорбциялық сыйымдылығы (0,727 мл/г) оның кеуекті құрылымының тығыздығымен және микрокеуектерге қолжетімділіктің шектеулі болуымен түсіндіріледі.

Осылайша, зерттеу нәтижелері биошикізат түрі мен химиялық белсендіру параметрлері көміртекті сорбенттердің кеуекті құрылымын, функционалдық құрамын және адсорбциялық тиімділігін анықтайтын негізгі факторлар екенін көрсетті. Алынған сорбенттер ұшқыш органикалық қосылыстарды, соның ішінде полярсыз көмірсутектерді, сондай-ақ ауыр металл иондарын адсорбциялау үшін перспективті материалдар болып табылады және оларды ауа мен ағынды суларды тазарту жүйелерінде қолдануға болады.

Кесте 3. Циклогексан адсорбциясы бойынша белсендірілген көмір үлгілерінің салыстырмалы тиімділігі

Үлгі	Сорбциялық қабілеті, мл циклогексан/г	Құрылымдық түсіндірме
БС (бел.)	1,829	Жоғары микрокеуектілік, кеуек торының жақсы тармақталуы
КҚ (бел.)	1,500	Микро- және мезокеуектердің үйлесуі, массалық тасымалдың жақсаруы
ҚҮ (бел.)	1,381	Орташа дамыған микрокеуекті құрылым
ЖҚ (бел.)	0,727	Тығыз құрылым, микрокеуектерге қолжетімділіктің шектеулі болуы

Авторлардың үлесі

Алмагуль Керимкулова: зерттеу тұжырымдамасы, әдістемені әзірлеу, зерттеуге басшылық ету, нәтижелерді ресми талдау және түсіндіру, қолжазбаның түпнұсқа мәтінін жазу, жобаны басқару. **Ерсұтан Ермолданов:** негізгі эксперименттік зерттеулер жүргізу, эксперименттік деректерді өңдеу және талдау, нәтижелерді визуализациялау, мақаланың түпнұсқа мәтінін жазуға қатысу. **Назым Асанбек:** эксперименттік жұмыстарға қатысу, үлгілерді дайындау және деректерді жинау. **Мейрам Атаманов:** ғылыми стильге келтіру, түзету, әдебиеттер қосу. **Асем Жумагалиева:** әдеби шолу жасау, тақырыпқа қатысты жаңа бағыттарды анықтау, зерттеу гипотезаларын талқылау. **Гульнур Нысанбаева:** әдеби дереккөздерді талдау, деректерді өңдеуге және кестелер мен графикалық материалдарды дайындауға қатысу. **Толғанай Атаманова:** эксперименттік құралдарды калибрлеу, әдістерді стандарттау және сапаны бақылау. **Айтуған Сабитов:** ресурстармен қамтамасыз ету, зерттеуді әдіснамалық сүйемелдеуге қатысу. **Ерлан Досжанов:** бағдарламалық қамтамасыз ету, техникалық деректерді өңдеу, қолжазбаны безендіру және соңғы тексеру. **Жакпар Жандосов:** деректерді статистикалық өңдеу, құрылымдық талдау және нәтижелерді интерпретациялау.

Мүдделер қақтығысы туралы мәлімдеме

Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Алғыс

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары Білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды (грант No AR22786556).

References

[1]. S. Tunay, R. Koklu, M. Imamoglu. Highly Efficient and Environmentally Friendly Walnut Shell Carbon for the Removal of Ciprofloxacin, Diclofenac, and Sulfamethoxazole from Aqueous Solutions and Real Wastewater. *Processes* 12 (2024) 2766. <https://doi.org/10.3390/pr12122766>.

[2]. D.Y. Dvoryankin, M.E. Safonova, I.A. Klepalova, I.G. Pervova. Carbon-based sorbents from wood and plant waste. *Forests of Russia and*

their management 1 (2024). (In Russ.). <https://cyberleninka.ru/article/n/uglerodnye-sorbenty-na-osnove-drevesnyh-i-rastitelnyh-othodov>.

- [3]. Ye.O. Doszhanov, A.N. Sabitov, K.A. Saurykova, Z.A. Mansurov, O.M. Doszhanov, et al. Production and optimization of activated carbon from plant waste with high specific surface area for moisture-saving applications in agriculture. *Combustion and Plasma Chemistry* 22 (2024) 159-167. [https://doi.org/10.18321/cpc22\(3\)159-167](https://doi.org/10.18321/cpc22(3)159-167).
- [4]. V.S. Chirkova, N.A. Sobgayda, F.A. Rzazade. Adsorbents based on agro-industrial waste for wastewater treatment. *Bulletin of Kazan Technological University* 20 (2015). (In Russ.). <https://cyberleninka.ru/article/n/sorbenty-na-osnove-othodov-agropromyshlennogo-kompleksa-dlya-ochistki-stochnyh-vod>.
- [5]. J.Wang and S. Wang. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production* 227 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>.
- [6]. N. Ahmadi, Y. Doszhanov, A. Kerimkulova, M. Zahid, K. Saurykova, et al. The Adsorption Capacity of Activated Carbon Made from Walnut Shells: Composition, Properties and Environmental Applications. *Preprints(2025)2025031090*. <https://doi.org/10.20944/preprints202503.1090.v1>.
- [7]. A. Bumadzhad, M.J. Hossein Khan, J.P. Lukashovich. Nitrogen-enriched activated carbon derived from plant biomasses: a review on reaction mechanism and applications in wastewater treatment. *Frontiers in Materials* 10 (2023) 1218028. (In Russ.). <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1218028>.
- [8]. A. Merkel, A. Satayeva, F. Cannon, K. Howell, S. Meikle, et al. Characterisation of Activated Carbons Obtained from Rice Husk. *Eurasian Chemico-Technological Journal* 18 (2016) 299-304. (In Russ.). <https://doi.org/10.18321/ectj472>.
- [9]. V. Thakur, E. Sharma, A. Guleria, S. Sangar, K. Singh. Modification and management of lignocellulosic waste as an ecofriendly biosorbent for the application of heavy metal ions sorption. *Materials Today: Proceedings* 32 (2020) 608-619. (In Russ.). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.756>.
- [10]. R. Xie, H. Wang, Y. Chen, W. Jiang. Walnut shell-based activated carbon with excellent copper (II) adsorption and lower chromium (VI) removal prepared by acid-base modification. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 32 (2013) 688-696. (In Russ.). <https://doi.org/10.1002/ep.11686>.

- [11]. I.P. Ivanov and E.V. Veprikova. Effect of synthesis conditions on the structure and sorption properties of activated carbons from pine bark. *Chemistry of plant materials* 3 (2024). (In Russ.). <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-usloviy-polucheniya-na-strukturu-i-sorbtsionnye-svoystva-aktivirovannyh-ugley-iz-kory-sosny>.
- [12]. O. Tursunov, K. Mukhamedov, Ismailov A. Preparation and application of rice husk-based sorbents for wastewater purification. *Environmental Research and Technology* 5 (2022) 45-52.
- [13]. Y. Zeng, Y. Lin, M. Ma, H.Chen. A Review on the Removal of Heavy Metals from Water by Phosphorus-Enriched Biochar. *Minerals* 14 (2024) 61. <https://doi.org/10.3390/min14010061>.
- [14]. X. Zhang, B. Gao, Y. Zheng, X. Hu, A.E. Creamer, et al. Biochar for volatile organic compound (VOC) removal: Sorption performance and governing mechanisms. *Bioresource Technology* 245 (2017) 606-614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.025>.
- [15]. K.K. Kудайbergenov, E.K. Ongarbayev, Z.A. Mansurov, M.I. Tulepov. The study of microstructures of the rice husk and apricot stone for wastewater treatment. *International Journal of Biology and Chemistry* 6 (2013) 35-39. (In Russ.). <https://ijbch.kaznu.kz/index.php/kaznu/article/view/97>.
- [16]. G. Enaime and M. Lübken. Agricultural Waste-Based Biochar for Agronomic Applications. *Applied Sciences* 11 (2021) 8914. <https://doi.org/10.3390/app11198914>.
- [17]. Y. Doszhanov, M. Atamanov, J. Jandosov, K. Saurykova, Zh. Bassygarayev, et al. Preparation of Granular Organic Iodine and Selenium Complex Fertilizer Based on Biochar for Biofortification of Parsley. *Scientifica* (2024) 6601899, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2024/6601899>.
- [18]. Y. Shen. Rice Husk-Derived Activated Carbons for Adsorption of Phenolic Compounds in Water. *Global challenges* 2 (2018) 1800043 <https://doi.org/10.1002/gch2.201800043>.
- [19]. V.V. Korobochkin, M.H. Nguyen, N.V. Usoltseva, V.T. Nguyen. Production of activated carbon by pyrolysis of rice husk of Vietnam. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering* 328 (2017) 6-15. <https://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1877>.

Авторлар туралы мәліметтер

А.Р. Керимкулова – х.ғ.к., Жану проблемалары институтының жетекші ғылыми қызметкері, Satbayev University қауымдастырылған профессоры, Алматы, Қазақстан

E-mail: almusha_84@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8048-4970>

Е.Ж. Ермолданов – әл-Фараби ат. ҚазҰУ магистранты, Жану проблемалары институтының жоғ.дең. лаб., Алматы, Қазақстан

E-mail: eursultanermoldanov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0668-4744>

Н.М. Асанбек – әл-Фараби ат. ҚазҰУ докторанты, Жану проблемалары институтының кіші ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан

E-mail: naziko-asanbek@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4480-1756>

М.К. Атаманов – PhD, Жану проблемалары институтының жетекші ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан

E-mail: amk1310@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3028-481X>

А.Н. Жумағалиева – PhD, НУ зерттеушісі, Астана, Қазақстан

E-mail: assemzhumagali@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6686-2709>

Г.Р. Нысанбаева – PhD, Азаматтық авиация академиясының аға оқытушысы, Алматы, Қазақстан

E-mail: gulnur.83.29@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3667-3736>

Т.С. Атаманова – PhD, ҚазҰҚПУ оқытушысы, Алматы, Қазақстан

E-mail: tolganaytemirgaliyeva@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9811-8207>

А.Н. Сабитов – х.ғ.к., Жану проблемалары институтының жетекші ғылыми қызметкері, ҚазҰҚПУ аға оқытушы

E-mail: aitugans@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3677-8685>

Е.О. Досжанов – PhD, Жану проблемалары институтының зертхана меңгерушісі, әл-Фараби ат. ҚазҰУ қауымдастырылған профессоры

E-mail: Yerlan.Doszhanov@kaznu.edu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3454-8889>

Ж.М. Жандосов – х.ғ.к., Жану проблемалары институтының жетекші ғылыми қызметкері

E-mail: jandosov.j@kaznmu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3842-4397>

Synthesis of Porous Carbon Sorbent Materials Based on Bio-Raw Materials and Study of their Physicochemical Properties

A.R. Kerimkulova^{1,2}, Ye.Zh. Yermoldanov^{1,3*}, N.M. Asanbek^{1,3}, M.K. Atamanov¹, A.N. Zhumagaliyeva^{1,6}, G.R. Nyssanbayeva⁴, T.S. Atamanova⁵, A.N. Sabitov^{1,5}, Ye.O. Doszhanov^{1,3}, J.M. Jandosov¹

¹Institute of Combustion Problems, Bogenbay Batyr Str., 172, Almaty, Kazakhstan

²Satbayev University, Satpayev Str., 22a, Almaty, Kazakhstan

³Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Ave., 71, Almaty, Kazakhstan

⁴Civil Aviation Academy, Zakarpatskaya Str., 44, Almaty, Kazakhstan

⁵Kazakh National Women's Pedagogical University, Gogol' Str., 114/8, Almaty, Kazakhstan

⁶Nazarbayev University, Kabanbay Batyr Ave., 53, Astana, Kazakhstan

ABSTRACT

For the first time, an approach to the production of highly efficient porous carbon sorption materials based on lignocellulose agricultural waste has been developed and a comprehensive assessment of their physico-chemical properties has been carried out. Rice husks (RH), walnut shells (WSh), wheat straw (WSt) and pine sawdust (PS) were used as raw materials. The resulting carbonysates were chemically activated with potassium hydroxide at different mass ratios of the activating agent and the carbon matrix. To increase the surface chemical activity of sorbents, potassium hydroxide was used. The morphology of the surface and the elemental composition of the synthesized materials were studied using scanning electron microscopy and energy dispersion analysis, and the functional groups were studied using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). It has been established that an increase in the degree of activation leads to the development of a hierarchical porous structure with the formation of micro-, meso- and macropores, as well as to an increase in the content of oxygen- and nitrogen-containing functional groups on the surface of carbon materials. The greatest microporosity was achieved with a KOH:carbon mass ratio of 1:4. The formed functional structure helps to increase the sorption capacity of materials in relation to toxic pollutants of various nature. The results obtained confirm the prospects of using synthesized carbon sorbents as environmentally safe and economically feasible materials for cleaning air and water environments.

Keywords: porous structure, activated carbon, chemical activation, sorption, bio-raw materials.

Получение пористых углеродных сорбционных материалов на основе биосырья и исследование их физико-химических свойств

А.Р. Керимкулова^{1,2}, Е.Ж. Ермолданов^{1,3*}, Н.М. Асанбек^{1,3}, М.К. Атаманов¹, А.Н. Жумагалиева^{1,6}, Г.Р. Нысанбаева⁴, Т.С. Атаманова⁵, А.Н. Сабитов^{1,5}, Е.О. Досжанов^{1,3}, Ж.М. Жандосов¹

¹Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

²Satbayev University, ул. Сатпаева, 22а, Алматы, Казахстан

³Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

⁴Академия гражданской авиации, ул. Закарпатская, 44, Алматы, Казахстан

⁵Казахский национальный Женский Педагогический Университет, ул. Гоголя, 114/8, Алматы, Казахстан

⁶Назарбаев Университет, пр. Кabanбай батыра, 53, Астана, Казахстан

АННОТАЦИЯ

В работе разработан метод получения высокоэффективных пористых углеродных сорбционных материалов на основе сельскохозяйственных лигноцеллюлозных отходов и проведена комплексная оценка их физико-химических свойств. В качестве исходных материалов использовали рисовую шелуху (РШ), скорлупу грецкого ореха (ШГ), пшеничную солому (ПС) и сосновые опилки (СО), которые подвергали карбонизации. Химическую активацию полученных карбонизатов осуществляли гидроксидом калия в различных массовых соотношениях активатора и углеродной матрицы. Поверхностно-химическая активность сорбентов повышалась с помощью КОН. Морфология поверхности и элементный состав синтезированных материалов изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа, а функциональные группы – методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (ИК-спектроскопии). Установлено, что увеличение степени активации приводит к развитию иерархической пористой структуры с образованием микро-, мезо- и макропор, а также к увеличению количества кислородсодержащих и азотсодержащих функциональных групп на поверхности углеродных материалов. Наибольшая микропористость была достигнута при массовом соотношении КОН:углерод 4:1. Образовавшаяся функциональная структура способствует увеличению сорбционной способности материалов по отношению к токсичным загрязняющим веществам различной природы. Результаты подтверждают эффективность использования синтезированных углеродных сорбентов в качестве экологически безопасных и экономически эффективных материалов для очистки воздуха и воды.

Ключевые слова: пористая структура, активированный уголь, химическая активация, сорбция, биосырье.