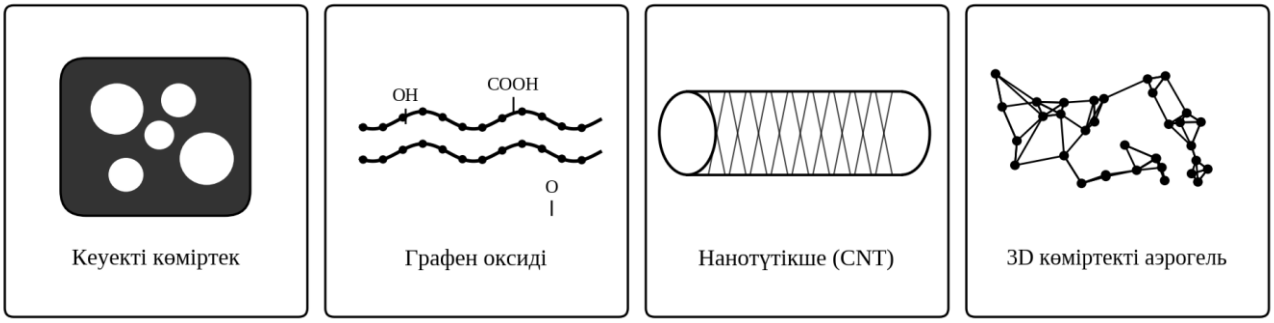
ДӘРІС 15. НАНОҚҰРЫЛЫМДЫ КӨМІРТЕКТІ СОРБЕНТТЕРДІҢ ЗАМАНАУИ ДАМУ БАҒЫТТАРЫ

Дәрістің мақсаты: наноқұрылымды көміртекті сорбенттердің түрлерін, құрылымы мен сорбциялық қасиеттерін түсіндіру; жаңа материалдарды әзірлеудің негізгі бағыттарын және олардың экологиялық қолданылуын талдау.

1. Наноқұрылымды көміртекті сорбенттер туралы түсінік

Наноқұрылымды көміртекті сорбенттер – құрамында нанометрлік деңгейде реттелген көміртек қабаттары, түтікшелер, бөлшектер немесе кеуектер бар, газдар мен сұйықтықтардағы заттарды ұстап қалуға арналған материалдар. Сорбция – заттың қатты дененің бетінде жиналуы (адсорбция) немесе көлеміне сіңуі (абсорбция); кеуекті көміртек үшін көбіне адсорбция басым болады. Мұндай материалдардың тиімділігі тек меншікті бет ауданына емес, кеуектің қолжетімділігіне, беттік топтарға және ерітінді жағдайына да тәуелді.

Негізгі өкілдері: белсендірілген көмір, графен және графен оксиді (GO), тотықсыздандырылған графен оксиді (rGO), көміртекті нанотүтікшелер (CNT), көміртекті нүктелер, биомасса негізіндегі кеуекті көміртек және үшөлшемді (3D) көміртекті аэрогельдер. Графен – бір атом қалыңдықтағы sp^2-көміртек торы; GO құрамындағы оттекті топтар оның гидрофильділігін және металдар иондарымен байланысу мүмкіндігін өзгерте алады. Аэрогельдің тұтас үлгісі ірі болуы мүмкін, бірақ оның қаңқасы наноқұрылымды.



1-сурет. Наноқұрылымды көміртекті сорбенттердің негізгі түрлері (сызбалық бейне).

2. Кеуек құрылысы және сорбциялық қасиеттері

IUPAC жіктеуі бойынша микрокеуектердің ені 2 нм-ден кіші, мезокеуектердікі 2–50 нм, макрокеуектердікі 50 нм-ден үлкен [1]. Микрокеуектер көптеген ұсақ молекулаларды сыйғызатын негізгі адсорбциялық кеңістікті қалыптастырады; мезокеуектер заттардың ішке өтуін жеңілдетеді, ал макрокеуектер тасымалдау арналары ретінде қызмет етеді. Сондықтан қазіргі сорбенттерде әртүрлі өлшемдегі өзара байланысқан кеуектерді біріктіру маңызды.

Сорбентті бағалауда BET әдісімен анықталатын меншікті бет ауданы ($м^2/г$), кеуек көлемі, бөлшек өлшемі, беттік функционалдық топтар, адсорбция сыйымдылығы (мг/г) және регенерациядан кейінгі тұрақтылық ескеріледі. BET көрсеткішінің жоғары болуы өздігінен барлық ластағыштарға жоғары тиімділікке кепіл болмайды: молекула өлшемі мен ерітінді pH-ы да шешуші рөл атқарады.

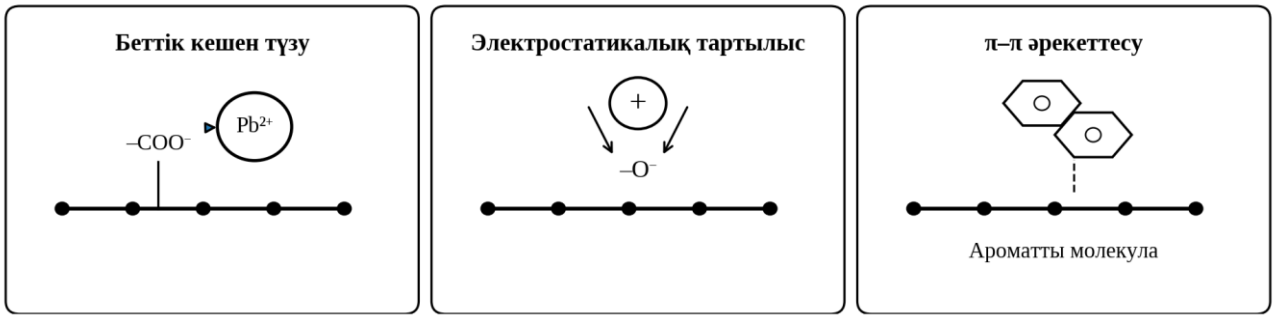
3. Заманауи дамудың негізгі бағыттары

3.1. Беттік функционалдандыру. Көміртек бетіне –OH, –COOH, –NH_2 және күкіртті топтарды енгізу адсорбциялық орталықтардың табиғатын өзгертеді. Мысалы, карбоксил және амин топтары кейбір металл иондарын кешен түзу арқылы байланыстыра алады. Азотпен, күкіртпен немесе фосформен легирлеу электрондық құрылымға әсер етеді; нақты селективтілік тәжірибемен дәлелденуі тиіс [2, 3].

3.2. Иерархиялық кеуекті құрылымдар. Микро-, мезо- және макрокеуектерді бір жүйеге біріктіру адсорбция сыйымдылығы мен массалық тасымал арасындағы тепе-теңдікті жақсартуға бағытталған. Гидротермиялық құрастыру, бағытталған мұздату, шаблондау және химиялық активтендіру арқылы графен аэрогельдері мен кеуекті көміртек қаңқалары алынады. Үшөлшемді тор ұнтақ наноматериалдардың агломерациясын азайтып, сорбентті судан ажыратуды жеңілдетуі мүмкін [3].

3.3. «Жасыл» шикізат пен синтез. Ағаш қалдығы, өсімдік сабағы, целлюлоза және басқа биомассадан биокөмір әрі белсендірілген көмір алу зерттелуде. Пиролизден кейін бу, CO_2 немесе химиялық реагенттермен активтендіру кеуектілікті арттыруы мүмкін. Алайда энергия шығынын, қолданылатын қышқыл-сілті мөлшерін және қалдық суларды да есепке алу қажет: тек биологиялық шикізатты пайдалану технологияны автоматты түрде экологиялық таза етпейді.

3.4. Гибридті және басқарылатын сорбенттер. Көміртекті материалды темір оксидтерімен біріктіру магниттік бөлуге, ал полимермен біріктіру түйіршік, мембрана немесе берік монолит жасауға мүмкіндік береді. Фотокаталитикалық компоненті бар композиттерде адсорбция мен ластағышты ыдырату қатар қарастырылуы мүмкін. Дегенмен магниттік бөлшектердің ерітіндіге шайылуын және композиттің ұзақмерзімді тұрақтылығын бақылау міндетті [2, 4].



2-сурет. Функционалдандырылған көміртек бетіндегі адсорбция механизмдерінің мысалдары.

4. Адсорбция механизмдері

Ластағыштың табиғатына қарай физикалық кеуек толтыру, электростатикалық тартылыс, беттік кешен түзу, ион алмасу, сутектік байланыс және π–π әрекеттесу байқалуы мүмкін. Мысалы, Pb^{2+} немесе Cd^{2+} иондары оттекті топтармен байланыса алады; ароматты бояғыштар графеннің π-электрондық жүйесімен әрекеттесуі мүмкін. Бір тәжірибеде бірнеше механизм қатар жүретіндіктен, механизмді тек кинетикалық модельге қарап анықтауға болмайды; pH-тәуелділік, спектроскопия және бәсекелес иондар әсері қарастырылады.

5. Қолданылу салалары және тиімділікті бағалау

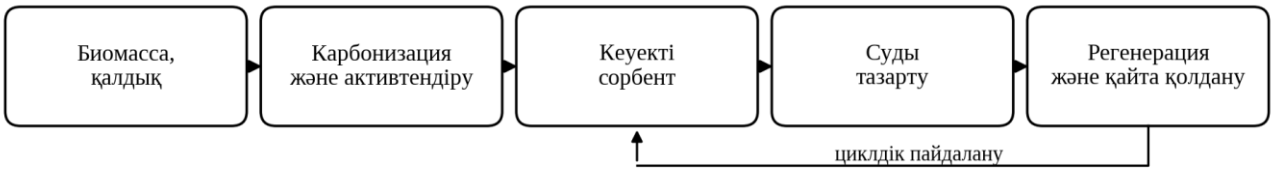
Су тазарту саласында көміртекті сорбенттер ауыр металл иондарын, синтетикалық бояғыштарды, мұнай өнімдерін, фармацевтикалық қалдықтарды және басқа органикалық микроластағыштарды бөлу үшін зерттеледі [2, 4]. Газ тазартуда CO_2, ұшқыш органикалық қосылыстар және кейбір иісті компоненттерді ұстауға назар аударылады. Нақты өндірісте ерітіндінің күрделі құрамы, тұздар, табиғи органикалық заттар және ағынның жылдамдығы сорбция нәтижесін өзгертуі мүмкін.

5.1. Адсорбциялық тиімділікті бағалау

Зертханалық жұмыста бастапқы концентрация C_0 және тепе-теңдік концентрациясы C_e (мг/л), ерітінді көлемі V (л) және сорбент массасы m (г) анықталады. Адсорбциялық сыйымдылық мына теңдеумен есептеледі: $q_e = (C_0 - C_e)\cdot V/m$ (мг/г). Тазарту дәрежесі: $R = (C_0 - C_e)/C_0\cdot 100\%$. Нәтижені салыстырғанда pH, температура, жанасу уақыты, сорбент дозасы, иондық күш және тәжірибенің қайталануы бірге көрсетілуі қажет.

6. Өнеркәсіптік енгізу кезіндегі мәселелер

Қазіргі зерттеулердің басты мақсаты – тек жоғары сыйымдылық емес, селективті, механикалық берік әрі бірнеше рет қолданылатын сорбент жасау. Ұнтақ наноматериалды судан толық бөлу қиын болуы мүмкін; сондықтан түйіршіктелген көміртек, мембраналық қабат, магнитті композит және монолит аэрогель түрлері перспективалы. Регенерация үшін pH өзгерту, десорбциялаушы ерітінді пайдалану немесе термиялық өңдеу қолданылуы мүмкін, бірақ әр циклдегі сыйымдылықтың өзгеруі мен сорбцияланған ластағышты қауіпсіз кәдеге жарату бағалануы тиіс.



3-сурет. Қалдықтан көміртекті сорбент алудың және оны циклдік пайдаланудың жалпы сызбасы.

Болашақ даму бағыттарына нақты ағынды сулармен сынау, үздіксіз бағаналы адсорбцияда серпіліс қисығын алу, сорбенттің өмірлік циклін бағалау (LCA), экономикалық талдау және ықтимал экологиялық тәуекелді тексеру жатады. Қымбат әрі күрделі наноматериал әрқашан қарапайым белсендірілген көмірден тиімді болмауы мүмкін: шешім нақты тазарту міндетіне байланысты қабылданады.

Қорытынды

Наноқұрылымды көміртекті сорбенттердің дамуы кеуек құрылысын дәл басқаруға, бет химиясын мақсатты өзгертуге, жасыл шикізатты қолдануға және қайта пайдаланылатын композиттер құруға бағытталған. Ең маңызды өлшем – зертханалық жоғары көрсеткішті нақты ортадағы тұрақты, қауіпсіз және экономикалық тиімді технологияға айналдыру.

Бақылау сұрақтары

1) Микро-, мезо- және макрокеуектердің қызметі қандай? 2) Функционалдық топтар металл иондарының сорбциясына қалай әсер етеді? 3) Неліктен регенерация және нақты ағынды судағы сынақ маңызды?

Ұсынылатын әдебиеттер

[1] Thommes M. et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution. Pure Appl. Chem., 2015. DOI: 10.1515/pac-2014-1117.

[2] Liu X. et al. Carbonaceous adsorbents in wastewater treatment: From mechanism to emerging application. Sci. Total Environ., 2024, 955, 177106. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177106.

[3] Wei Y. et al. Structure-performance relationship of graphene aerogels in heavy metal remediation. Environ. Res., 2026, 293, 123752. DOI: 10.1016/j.envres.2026.123752.

[4] Bhushan B. et al. Graphene composites for water remediation: challenges and future prospects. Adv. Compos. Hybrid Mater., 2025, 8, 55. DOI: 10.1007/s42114-024-01088-x.