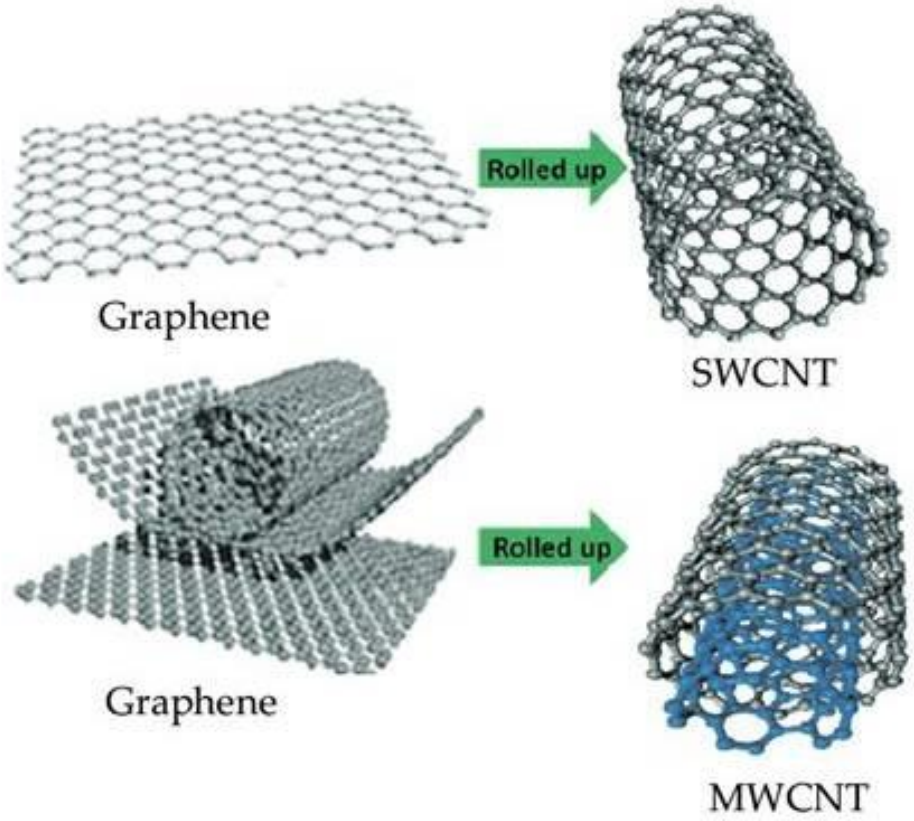
ДӘРІС 6

Көміртекті нанотүтікшелер негізіндегі сорбенттер

Көміртекті нанотүтікшелер: негіздері мен қасиеттері

Көміртекті нанотүтікшелерді (КНТ) алғаш рет **Сумио Иидзима 1991 жылы** доғалық разряд арқылы буландыру әдісімен алған.

КНТ — графен немесе графит қабатының түтік тәрізді оралуынан түзілетін құрылымдар.
Ішкі диаметрі нанометрлік, ал ұзындығы микрометрлік диапазонда болады.
Ұштары фуллеренге ұқсас жарты шар тәрізді құрылыммен жабылған.



Құрылысына байланысты:

- **Бірқабырғалы КНТ (SWCNT)** – бір графен қабатынан тұрады;
- **Көпқабырғалы КНТ (MWCNT)** – бірнеше концентрлі графен қабаттарынан тұрады.

SWCNT жоғары ұзындық/диаметр қатынасымен ерекшеленеді.
MWCNT қабаттары ван-дер-Ваальс күштері арқылы байланысқан, қабатаралық қашықтық **0,34 нм**.

Көпқабырғалы КНТ артықшылықтары және синтез әдістері

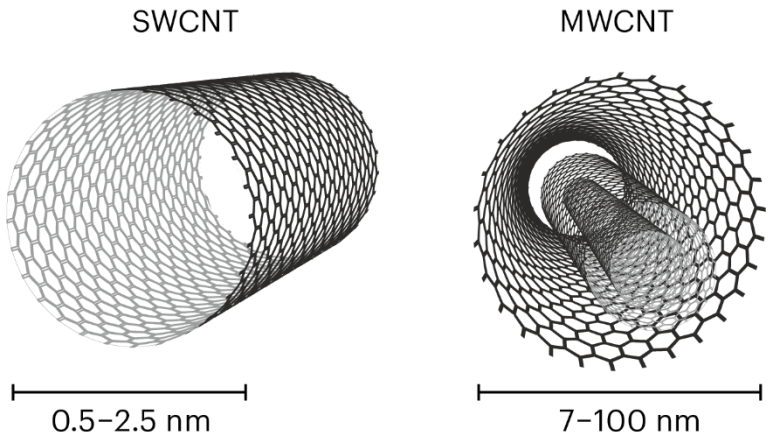
MWCNT-нің меншікті бет ауданы мен кеуек көлемі SWCNT-мен салыстырғанда төменірек.
Алайда олардың маңызды артықшылықтары бар:

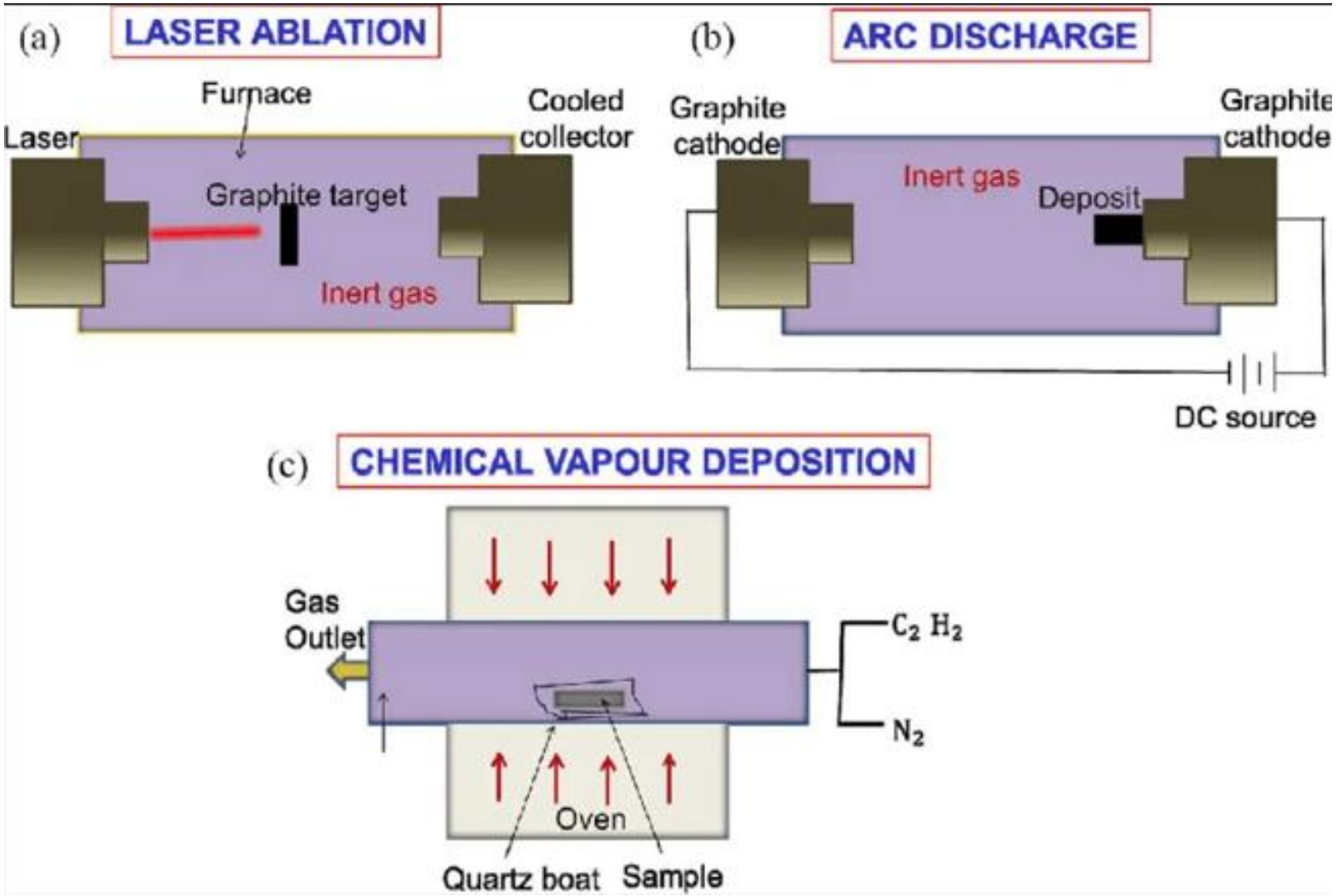
- өндіріс құны төмен;
- катализаторсыз синтездеуге болады;
- химиялық өңдеу негізінен сыртқы қабырғаларға әсер ететіндіктен, бастапқы қасиеттері сақталады.

Көміртекті нанотүтікшелерді синтездеудің негізгі әдістері:

- лазерлік абляция;
- жалындық синтез;
- химиялық бу фазасынан тұндыру;
- электролиз және басқа әдістер.

Бірегей қасиеттеріне байланысты КНТ ғылым мен технологияның көптеген салаларында кеңінен қолданылады.





Доғалық разряд, химиялық буды тұндыру (CVD) және лазерлік абляция

Көміртекті нанотүтікшелер — сорбент ретінде

Көміртекті нанотүтікшелер (КНТ) — **сулы ортадан әртүрлі ластаушы заттарды жою үшін кеңінен зерттелетін тиімді адсорбциялық материалдар**.

КНТ-ның адсорбент ретіндегі негізгі артықшылықтары:

- жоғары меншікті бет ауданы;
- жоғары кеуектілік;
- қолжетімді микрокеуектердің көп болуы;
- қуыс ішкі құрылым;
- қабатты құрылым;
- мезокеуектердің болуы;
- гидрофобтылық;
- бүйір қабырғаларының ерекше иілуі;
- π-конъюгацияланған құрылым;
- химиялық активтендірудің жеңілдігі;
- жеңіл салмақ;
- беткі қасиеттерін өзгерту мүмкіндігі;
- коррозияға жоғары төзімділік;
- басқа материалдарды қаптауға немесе тұндыруға қолайлы;
- суды жоғары өткізгіштік.

Адсорбция:

КНТ-ның **сыртқы беті де, ішкі мезо- және микрокеуектері де** адсорбция процесіне қатысады. Үлкен молекулалар негізінен сыртқы бетке, ал кіші молекулалар ішкі беттерге адсорбцияланады.

КНТ-дағы адсорбциялық орталықтар

КНТ-дағы адсорбциялық орталықтар **4 топқа** бөлінеді:

1. Ішкі орталықтар (Internal sites)

→ КНТ-ның цилиндр тәрізді қуыс құрылымының ішінде орналасады.

2. Аралық арна орталықтары (Interstitial pathway sites)

→ Жеке КНТ-лар арасындағы арналарда орналасады.

3. Сыртқы бет (Outer surface)

→ Нанотүтікшенің сыртқы қабырғасында орналасқан адсорбциялық орталықтар.

4. Сыртқы ойықтар (Outer grooves)

→ Ең сыртқы орналасқан нанотүтікшелер бір-бірімен түйіскен жерлерде пайда болады.

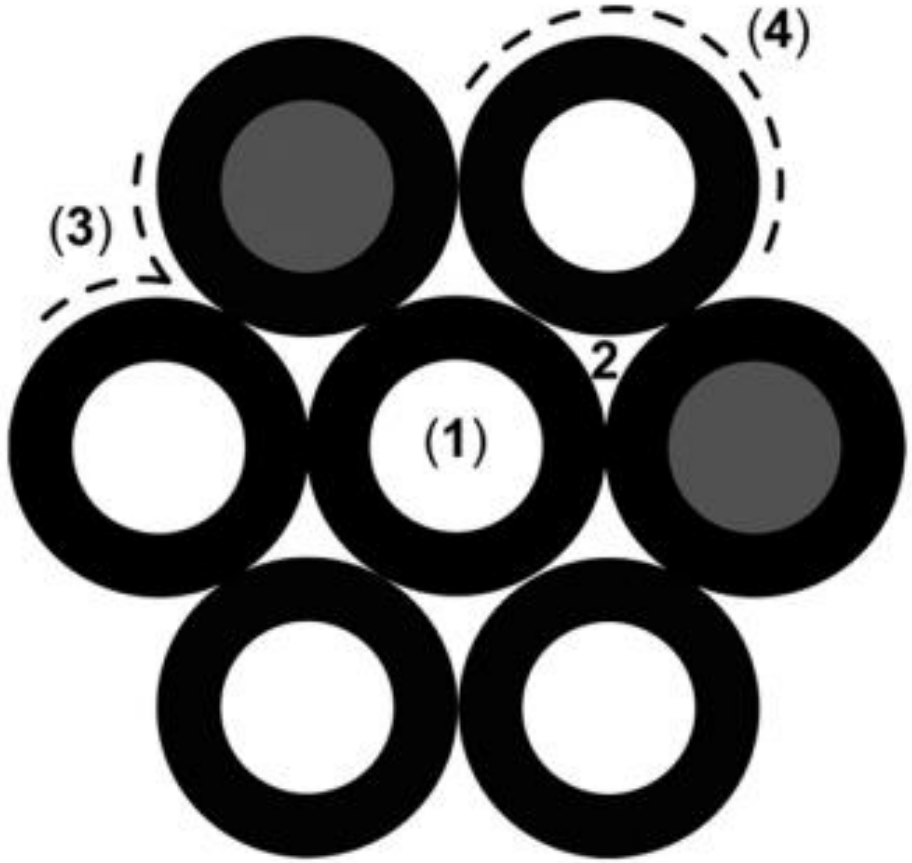
Маңызды: КНТ-дағы кеуек өлшемі мен көміртек атомдарының **алтыбұрышты орналасуы** КНТ мен ластаушы заттар арасындағы тиімді әрекеттесуді қамтамасыз етеді.

КНТ-ның қосымша ерекшеліктері:

•физикалық адсорбция үшін химиялық инертті бет;

•атомдық деңгейде жақсы анықталған және біркелкі құрылым;

•активтелген көмірмен салыстырғанда құрылымы реттелген.



Ішінара ашық ұштары бар біртектес бір қабырғалы көміртегі нанотүтікшелері (SWNT) шоғырындағы әртүрлі адсорбция орындары:

1) ішкі қуыс,
2) түтікшеаралық арна,
3) сыртқы ойық
4) сыртқы бет.

КНТ-ны адсорбция үшін функционалдандыру

Функционалдандыру — КНТ бетінің қасиеттерін өзгерту және олардың агрегациясын азайту әдісі.
Функционалдандырудың негізгі әдістері:
•механикалық;
•сәулелендіру;
•физика-химиялық әдістер.

Физика-химиялық функционалдандыру:
•**Ковалентті** — КНТ-дағы *sp²-гибридтену sp³-гибридтенуге* өзгеріп, π-конъюгацияның бір бөлігі жоғалады.
•**Ковалентті емес** — *sp²-гибридтену сақталады*, сондықтан КНТ-ның бастапқы қасиеттері жақсы сақталады.

Маңызды ерекшелік:
•КНТ ұштары қабырғаларына қарағанда реактивтірек.
•Сондықтан функционалдық топтардың көпшілігі **нанотүтікшелердің ұштарына** енгізіледі.
•Беткі функционалдандыру КНТ-ның белгілі бір ластаушыларға қатысты **адсорбциялық қабілеті мен селективтілігін арттырады**.
•Құрамында оттегі бар функционалдық топтар гидрофильділікті арттырып, КНТ-ның сулы ортада дисперсиялануын жақсартады.

Функционалдық топтар және олардың адсорбцияға әсері

КНТ-ға енгізілетін функционалдық топтар құрамындағы гетероатомға байланысты:

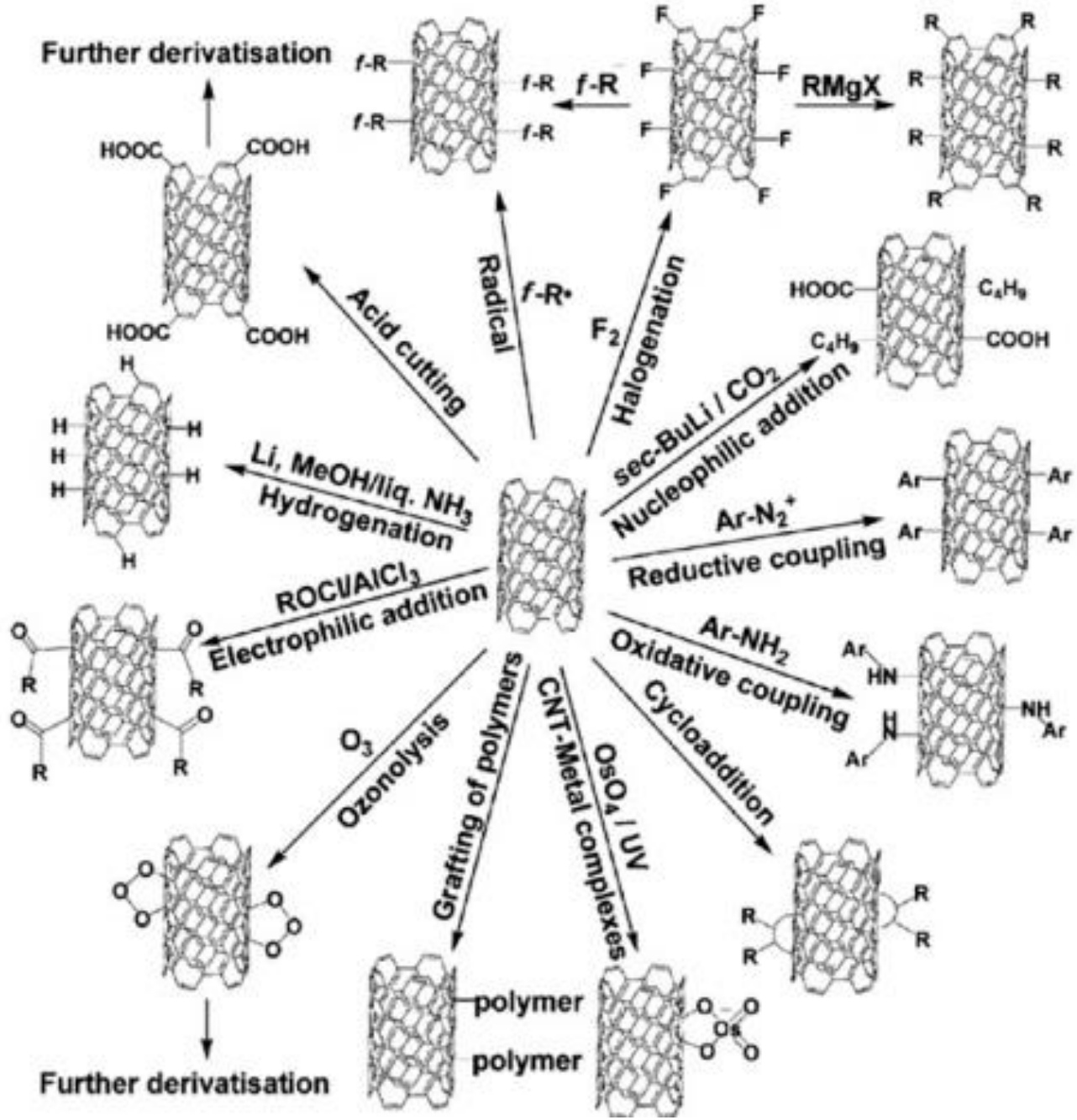
Оттекті топтар: беткі реакциялар мен қасиеттерге әсер етеді; гидрофильділікті арттырады; сулы ерітіндіде дисперсиялануын жақсартады.

Азотты топтар: сорбентке негіздік қасиет береді; металдардың адсорбциясын арттырады; сорбенттің кеуектілігіне айтарлықтай әсер етпейді; оттекті топтармен бірге **синергиялық әсер** береді.

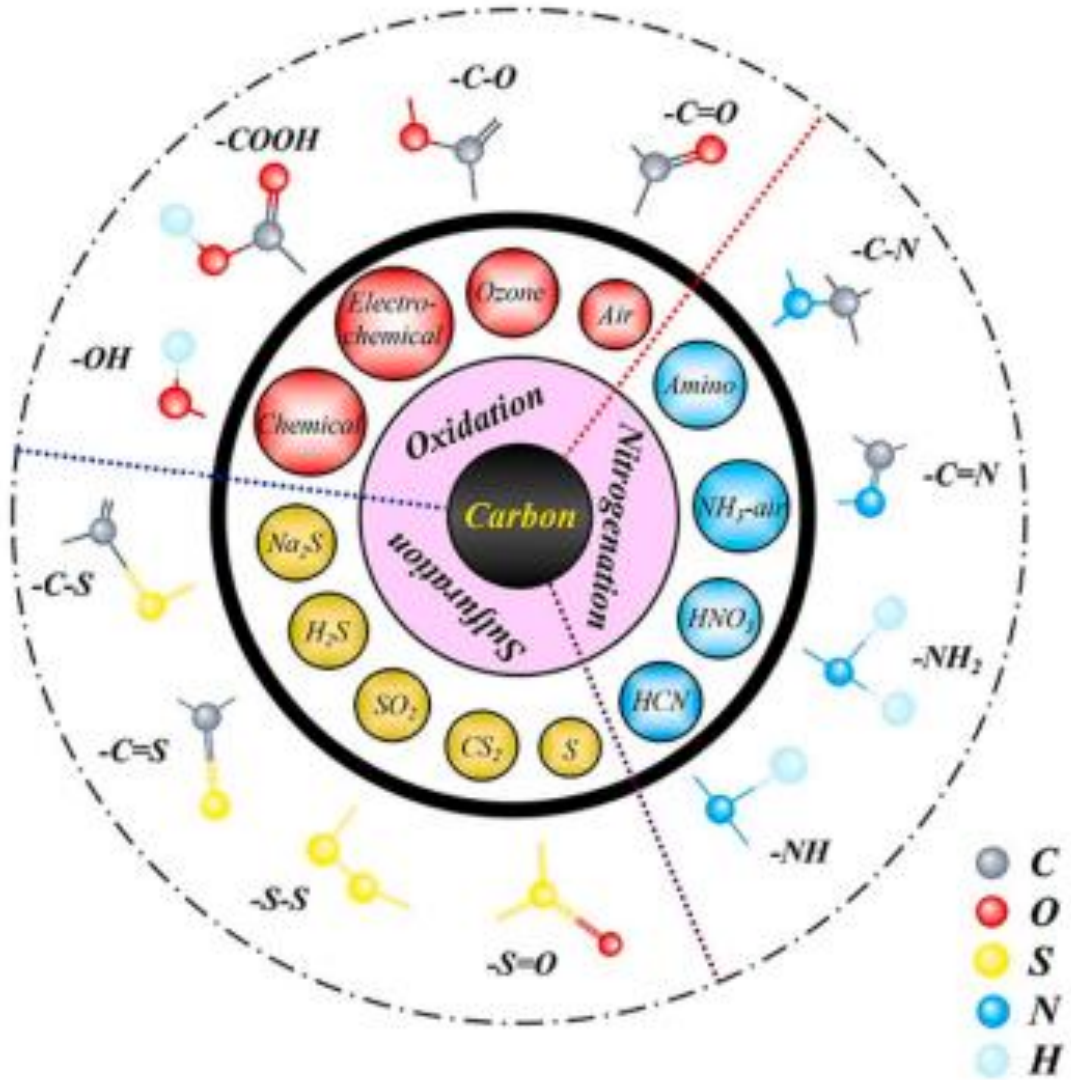
Күкіртті топтар: кейбір металдарды **селективті адсорбциялау** үшін қолданылады; модификация жағдайына байланысты меншікті бет ауданы мен кеуек өлшемін арттыруы немесе төмендетуі мүмкін.

Функционалдандырудың негізгі бағыттары: π-конъюгацияланған бөлік арқылы ковалентті байланыс; әртүрлі топтармен ковалентті емес функционалдандыру; КНТ-ның ішкі қуыс бөлігін басқа заттарды енгізу арқылы байыту. **Нәтижесінде:** КНТ бетінің қажетті функционалдық топтармен байытылуы белгілі бір ластаушыларға **селективтілікті және адсорбциялық жою тиімділігін арттырады**.

Функционалдық топ	Формуласы	Мысал
Оттекті топтар	–OH, –COOH, –C=O, –O–	гидроксил, карбоксил, карбонил, эфир
Азотты топтар	$–NH_2$, –NHR, $–NR_2$, $–NO_2$	амин, нитро топтары
Күкіртті топтар	–SH, –S–, $–SO_3H$	тиол, сульфид, сульфон қышқылы


Further derivatisation
HOOC
COOH
HOOC
COOH
Acid cutting
f-R
f-R
f-R
f-R
f-R
Radical
f-R•
F2
Halogenation
RMgX
R
R
R
R
R
R
HOOC
C4H9
C4H9
COOH
sec-BuLi / CO2
Nucleophilic addition
H
H
H
H
H
H
Li, MeOH/liq. NH3
Hydrogenation
Ar-N2+
Reductive coupling
Ar
Ar
Ar
Ar
ROCl/AlCl3
Electrophilic addition
O
O
R
R
O
O
R
R
Ar-NH2
Oxidative coupling
Ar
HN
H
N
Ar
NH
Ar
O3
Ozonolysis
Grafting of polymers
CNT-Metal complexes
OsO4 / UV
Cycloaddition
R
R
R
R
polymer
polymer
O
O
Os
O
O
Further derivatisation

Модификация әдістері	Артықшылықтары
Тотығу • Қышқылмен өңдеу • $KMnO_4$-пен өңдеу • Қышқылдар қоспасымен өңдеу • Қышқылдар және басқа тотықтырғыштар қоспасымен өңдеу	• Спирттік, карбоксилдік және кетондық функционалдық топтарды енгізу • Ластағыштарды, әсіресе металдарды, жою тиімділігін арттыру • Кейінгі функционализацияны жеңілдету • Гидрофильділікті арттыру → сулы ортада оңай дисперсиялану
Негіздермен активтендіру • KOH сияқты негіздермен өңдеу	• Аниондық және катиондық ластағыштарды жою
Бетке селективті функционалдық топтарды енгізу үшін химиялық өңдеу • Күкірттендіру (сульфирлеу) • Азоттандыру	• CNT бетін қажетті функционалдық топтармен модификациялау арқылы нысаналы ластағыштарды селективті жою • Мысалы: сынап үшін тиол топтары, металдар үшін амин топтары
Полимерлермен модификациялау • Ерітіндіде араластыру • Балқымада араластыру • In situ полимерлену	• Органикалық ластағыштарға жақындығын арттыру • Кең ауқымды жағдайларда тұрақтылығын арттыру
Магниттік нанобөлшектермен модификациялау • Химиялық будан тұндыру (CVD) • Золь–гель әдісі • Шаблондық синтез • Сольвотермиялық/гидротермиялық әдіс • Толтыру процесі • Пиролиз	• Адсорбциядан кейін оңай бөліп алу • Сулы ортада жылдам дисперсиялану
Металл/металл оксиді нанобөлшектерімен модификациялау • Өзін-өзі жинақтау • Сольвотермиялық әдіс • Гидротермиялық кристалдану • Ex situ және in situ әдістері • Пиролиз	• CNT бетінің көптеген нуклеация орталықтары M/MO нанобөлшектерін қабылдап, олардың агломерациясын болдырмайды → ластағыштардың адсорбциясы жақсарады • Композит құрылымының реакциялық қабілетін арттыру • Қосымша теріс зарядталған орталықтардың түзілуі металл катиондарының адсорбциясына қолайлы болуы мүмкін • Металл ластағыштарын жою тиімділігін арттыру
Басқа адсорбенттермен модификациялау Мысалы: көміртек негізді материалдар, MOF, циклодекстрин • Композит түзу • Золь–гель әдісі • Сольвотермиялық әдіс	• CNT басқа сорбенттер үшін тірек қызметін атқарады • CNT/басқа адсорбент комбинациялары ластағыштардың адсорбциясына синергиялық әсер көрсетеді



Көміртекті адсорбенттерді түрлі функционалдық топтармен функционалдауға арналған модификациялау әдістері.

Бейорганикалық және органикалық ластағыштардың адсорбциялану механизмдері

CNT-дің адсорбциялық қасиетіне әсер ететін факторлар:
•CNT цилиндрлік құрылымға ие, ұштары **ашық немесе жабық** болуы мүмкін;
•ашық және жабық ұштардың арақатынасы адсорбция тиімділігіне әсер етеді;
•**тазалығы, адсорбциялық орталықтардың тығыздығы және беттік функционалдық топтары** маңызды;
•CNT бетінің ауданы оның **морфологиясы мен қоспалардың болуына** тәуелді;
•қоспалар CNT шоғырларының сыртқы бетінде қабат түзіп, адсорбция тиімділігін өзгертуі мүмкін.

Ластағыштармен әрекеттесу механизмдері:
•гидрофобтық әрекеттесу;
•химиялық және электростатикалық әрекеттесу;
•**π–π stacking**;
•Льюис қышқылы–негіз әрекеттесуі;
•Ван-дер-Ваальс әрекеттесуі;
•беттік комплекстену;
•сутектік байланыс.

Металдарды CNT арқылы адсорбциялау

Таза CNT → негізінен физикалық адсорбция
Металл иондарын тиімді адсорбциялау үшін CNT-терді:
•**модификациялау;**
•басқа материалдармен **композит түзу;**
•бетіне қажетті **функционалдық топтарды енгізу** қажет.

Қышқылдармен немесе тотықтырғыштармен өңдеу:
→ бетте теріс зарядталған **–OH, –COOH, –CHO, >C=O** топтары түзіледі
→ оң зарядталған металл иондарын адсорбциялау артады
→ электростатикалық әрекеттесу және сутектік байланыс жүреді.

Қышқылмен өңдеу:
•CNT қоспаларын жояды;
•жабық ұштарын ашуға ықпал етеді;
•HNO_3 өңдеуі MWCNT бетіндегі оттек мөлшерін **4,8%-дан 14%-ға** дейін арттырған.

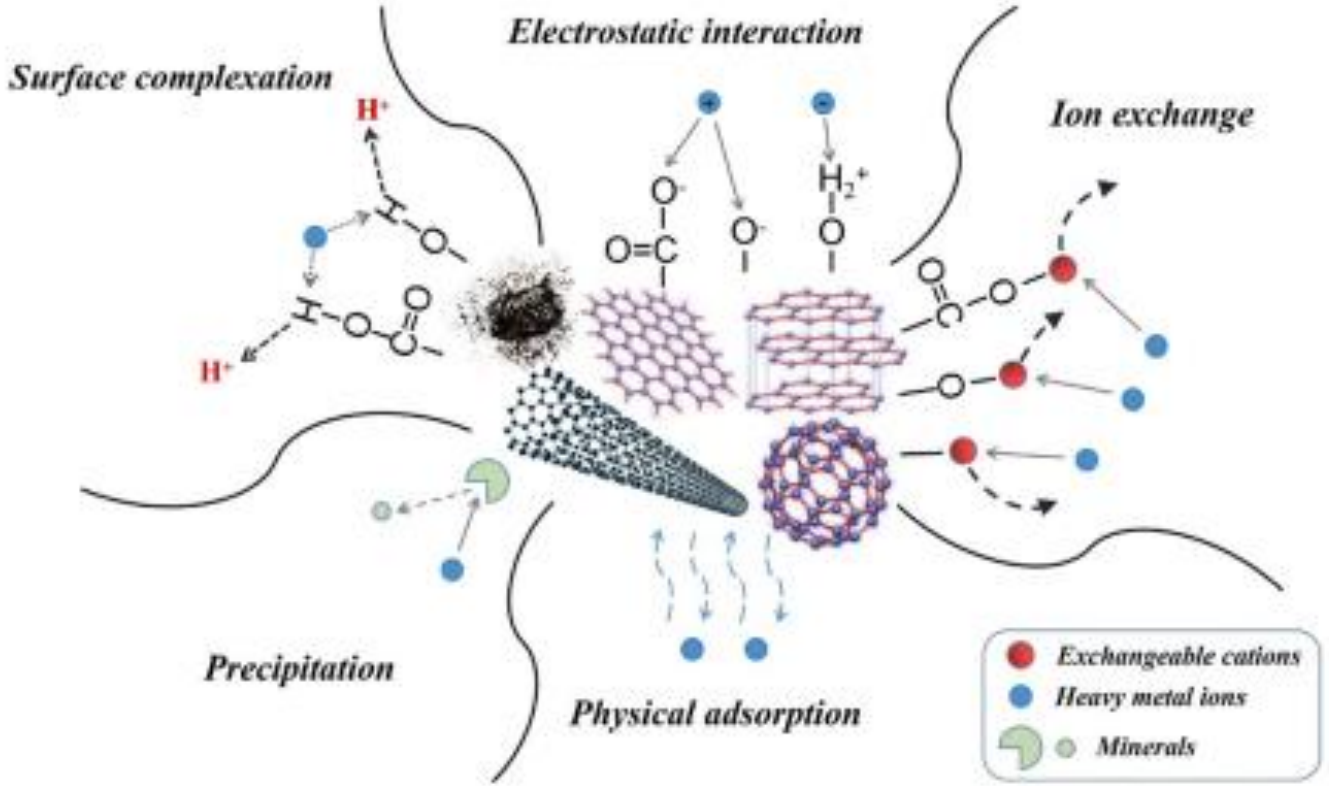
Композиттер:
•Al_2O_3, ZnO, SnO_2 және т.б. металл оксидтерімен модификациялау;
•MWCNT + темір оксиді → металл ластағыштарға адсорбциялық қабілеті жоғарылайды;
•магниттік композит → адсорбциядан кейін оңай бөлініп алынады.

Адсорбцияға әсер ететін факторлар және механизмдер

Негізгі факторлар:
pH | иондық күш | CNT мөлшері | жанасу уақыты

pH әсері:
•жоғары pH → адсорбент беті **теріс зарядталады**;
•төмен pH → бет **оң зарядталады**;
•зарядтың ауысуы **pH_{pzc}** нөлдік заряд нүктесімен байланысты.

Металл иондарының адсорбция механизмдері
→ CNT бетінің химиялық құрамы, құрылымы, металл ионының табиғаты және ерітіндінің химиялық ортасы адсорбция механизмін анықтайды.



Механизм	Негізгі ерекшелігі
Физикалық адсорбция	Кеуек өлшемі мен беткі аудан маңызды; микрокеуектер → беткі аудан ↑; мезокеуектер → диффузия және адсорбция жылдамдығы ↑
Электростатикалық әрекеттесу	Теріс зарядталған CNT беті ↔ оң зарядталған металл иондары
Ион алмасу	–OH және –COOH топтарындағы H^+ металл иондарымен алмасады; pH және ион өлшеміне тәуелді
Беттік комплекстену	Металл иондары беттегі көпатомды орталықтармен байланысады
Тұнба түзілу	Адсорбция барысында ерітіндіде немесе бетте қатты өнімдердің түзілуі

CNT негізіндегі адсорбенттердегі металл иондарының адсорбция механизмдері

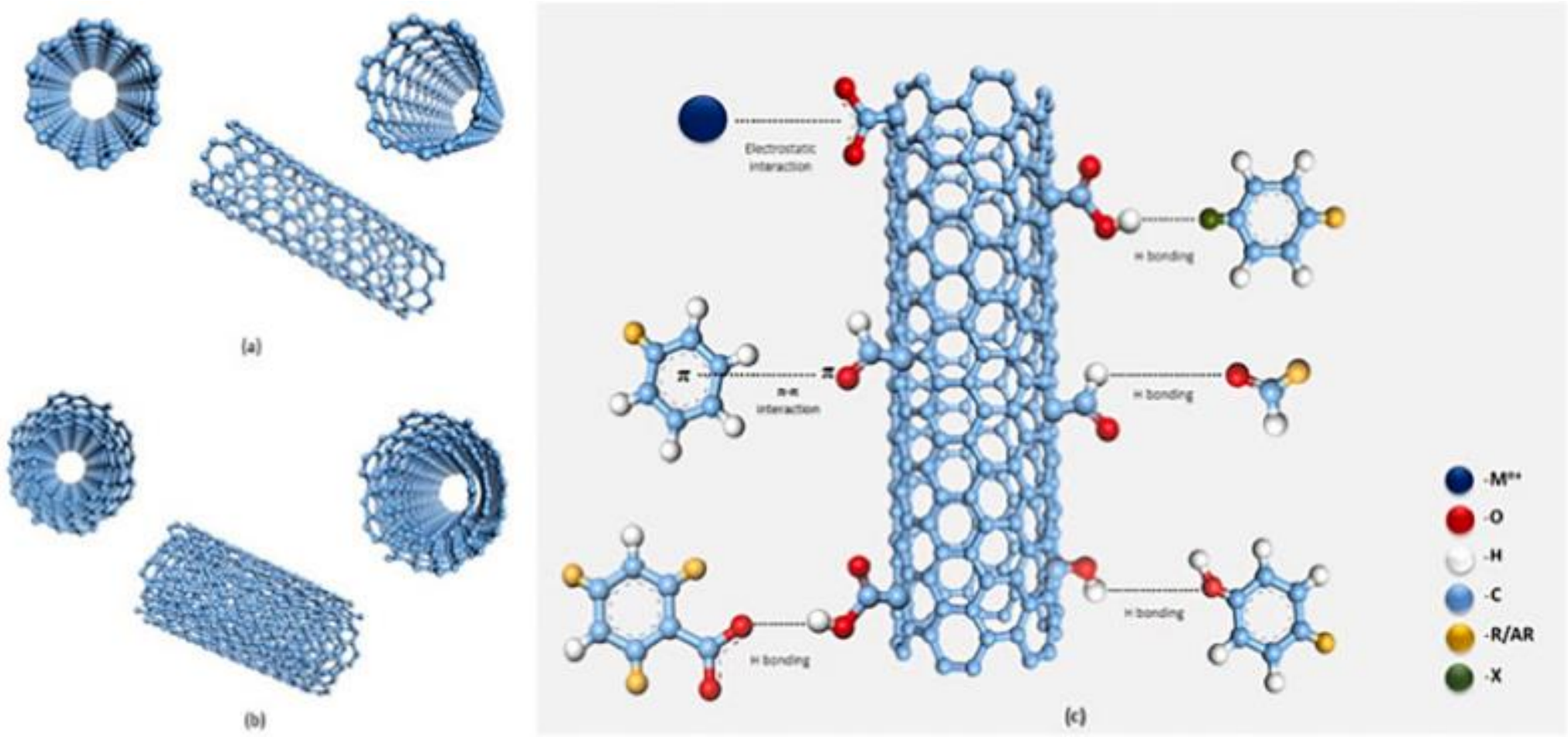
Механизм	Ерекшеліктері
Физикалық адсорбция	• Металл иондарының CNT кеуектеріне диффузиялануы және тұнуы арқылы жүреді. • Ең әлсіз әрекеттесу түрі, себебі химиялық байланыс түзілмейді. • CNT кеуектерінің өлшемдік таралуы мен меншікті беткі ауданымен тығыз байланысты. • Кеуектер мен беткі ауданның артуы физикалық адсорбцияны және оның кинетикасын күшейтеді. • Беттің біртексіздігі, функционалдық топтар және полярлық та әсер етуі мүмкін.
Электростатикалық әрекеттесу	• CNT негізіндегі адсорбент беті оң немесе теріс зарядталған кезде қарама-қарсы зарядталған металл иондарымен электростатикалық әрекеттеседі. • Ерітіндінің pH мәніне және CNT негізіндегі адсорбенттің pH_pzc мәніне қатты тәуелді. • Функционалдық топтар протондалған немесе депротондалған жағдайда металл иондарымен немесе бөлшектерімен сәйкесінше әрекеттеседі.
Беттік комплекстену	• CNT бетіндегі функционалдық топтар металл иондарымен немесе комплекстерімен әрекеттесіп, көпатомды құрылымдар түзеді. • Бұл процесте –OH және –COOH топтарының маңызы зор.
Ион алмасу	• –OH және –COOH сияқты оттек құрамды топтармен функционалдандырылған адсорбенттерге тән. • Бұл топтар протондарын металл иондарымен, негізінен екі валентті иондармен, алмастырады. • Ион алмасу иондардың өлшеміне және ерітіндінің pH мәніне тәуелді. • Адсорбенттің ион алмасу сыйымдылығы оның осы процестегі мүмкіндігін көрсетеді.
Тұндыру / қоса тұндыру	• Адсорбент бетінде немесе ерітіндіде қатты өнімдердің түзілу процесі. • Ауыр металл иондары адсорбент бетінде басқа металл иондарымен немесе функционалдық топтармен бірге тұнба түзуі мүмкін. • Ерітіндідегі металл концентрациясы жоғары болған кезде тұнба түзілу ықтималдығы артады.

CNT арқылы органикалық ластағыштардың адсорбциясы

Негізгі әрекеттесу механизмдері:
•**Гидрофобтық әрекеттесу** – таза CNT-тердің гидрофобты беті көмірсутектермен әрекеттеседі.
•**π–π әрекеттесуі** – CNT-дегі делокализацияланған π-электрондар ↔ органикалық молекулалардың ароматты сақиналары немесе –C=C– топтары.
•**Ван-дер-Ваальс әрекеттесуі**
•**Электростатикалық әрекеттесу**
•**Химиялық байланысу** – беттегі **–COOH және –OH** сияқты функционалдық топтар арқылы.

CNT қасиеттерінің әсері:
Функционалдық топтар + беткі аудан + кеуек құрылымы → адсорбция қабілеті
•CNT агломераттарындағы **микро-, мезо-, макрокеуектер** адсорбция сыйымдылығын арттырады.
•Кеуектердің капиллярлық толуы адсорбцияны қосымша күшейтеді.
•**Ароматты сақиналар саны артқан сайын → адсорбция артады.**
•**Жазық құрылымды** органикалық молекулалар жазық емес молекулаларға қарағанда күштірек адсорбцияланады.
•MWCNT үшін адсорбция **беткі аудан артқанда жоғарылайды**, ал CNT диаметрі артқанда төмендейді.
•Функционализацияланған CNT-тер **гидрофильді және гидрофобты** органикалық ластағыштарды адсорбциялай алады.

Адсорбция реті:
нитро > хлорид > метил



(a) Бір қабырғалы (SWCNT), (b) Көп қабырғалы (MWCNT) көміртекті нанотүтікшелер және (c) Органикалық бояғыштарды, ауыр металдарды және басқа да органикалық еріткіштерді жою кезінде көміртекті нанотүтікшелердің жоғары адсорбциялық қабілетін қамтамасыз ететін химиялық функционалдық топтар арасындағы өзара әрекеттесу механизмі.

CNT негізіндегі адсорбенттерді металдарды жоюда қолдану

Мақсаты:
Судағы **Cu^{2+}, Zn^{2+}, Pb^{2+}, Ni^{2+}, Cd^{2+}, As(V), Hg^{2+}, Cr(VI)** сияқты металл ластағыштарды жою.

Негізгі нәтижелер:
•**Тотыққан MWCNT (Ox-MWCNT)** → беткі ауданы және Cu(II), Zn(II) адсорбция сыйымдылығы бастапқы MWCNT-ге қарағанда жоғары.
•**Диаметрі 5–15 нм MWCNT** → Pb(II) және Ni(II) үшін жоғары адсорбциялық қабілет.
•**MWCNT–KOH–NiNPs** → Pb(II), As(V), Cd(II) жою тиімділігі жоғары; **8 адсорбция/десорбция циклінде** тиімділігін сақтаған.
•**CuS/MWCNT** → газды жою; негізгі механизм — **хемосорбция**.
•**β-циклодекстрин/магниттік MWCNT** → Ni^{2+} жою; жақсы дисперсия және адсорбентті оңай бөліп алу.
•**Хитозан-модификацияланған MWCNT** → Cr(VI) жою; хитозан мөлшерін екі есе арттыру → адсорбция тиімділігі жоғарылаған.
•**Этилендиаминмен модификацияланған MWCNT** → Pb(II) жою **>90%**, нақты ағынды суда **>99%**.
•**Гидроксиапатит/CNT композиттері** → металл иондарын адсорбциялау үшін қолданылған.

CNT модификациясының негізгі артықшылықтары
Беткі аудан ↑ | Гидрофильділік ↑ | Селективтілік ↑ | Дисперсия ↑ | Бөліп алу жеңілдейді

CNT негізіндегі адсорбенттердің металдарды жоюдағы қолданылуы

Адсорбент	Ластағыш	pH	Уақыт, мин	Адсорбция сыйымдылығы, мг/г	Изотерма / кинетика	Механизм	Қайта қолдану
MWCNTs-KOH@NiNPs	Pb(II), As(V), Cd(II)	5,5	30	481,0; 440,9; 415,8	Langmuir / PSO	Электростатикалық әрекеттесу, беттік адсорбция, ион алмасу, кеуек арқылы диффузия	8 цикл
AS-MWCNTs	Cu(II), Zn(II)	6	30	364; 347	Langmuir / PSO	Негізінен хемосорбция	6 цикл
OX-MWCNTs	Cu(II), Zn(II)	6	30	416; 411	Langmuir / PSO	Негізінен хемосорбция	6 цикл
β-CD@Fe_3O_4/MWCNT	Ni(II)	6	50	103	Langmuir / PSO	Электростатикалық тартылыс, ион алмасу, беттік комплекстену, «қонақ–қабылдаушы» әрекеттесуі	5 цикл
CS/MWCNTs/Fe	Cr(VI)	4	119	–	Langmuir / PSO	–	5 цикл
MWCNTs (5–15 нм)	Pb(II), Ni(II)	5,8	60	215; 230	Langmuir / PSO	Хемосорбциямен басқарылатын адсорбция	6 цикл
MWCNTs (16–25 нм)	Pb(II), Ni(II)	6	60	201; 206	Langmuir / PSO	Хемосорбциямен басқарылатын адсорбция	6 цикл
WCPO-CNTs	Cu(II)	7	–	29,22	Langmuir / –	Электростатикалық тартылыс/тебілу, химиялық әрекеттесу, адсорбция, тұндыру	–
PAAm/FMWCNTs	Cu(II)	5	90	320–385	Langmuir / PSO	Электростатикалық әрекеттесу және комплекс түзілуі	3 цикл
Поливинилформальдегид/MWCNTs көбігі	Pb(II)	5	60	3,4	Langmuir / PSO	Хемосорбция	10 цикл
MWCNT-HAP	Pb(II), Cd(II), Cu(II)	4–6	120	–	Langmuir (Pb, Cu); Langmuir және Freundlich (Cd) / PSO	Ыдырау–тұндыру, ион алмасу, беттік комплекстену	–

CNT арқылы органикалық ластағыштарды жою: бояғыштар

Бояғыштарды жоюдың маңызы

•Бояғыштар судың жарық өткізуін төмендетеді → су өсімдіктеріндегі **фотосинтез тежеледі** → экожүйе бұзылады.

•Адамдар мен жануарлардың денсаулығына кері әсер етеді.

CNT негізіндегі адсорбенттердің қолданылуы

Негізгі адсорбция механизмдері:

- **Электростатикалық әрекеттесу + сутектік байланыс + π–π әрекеттесуі**
- **Магниттік CNT → сыртқы магнит арқылы оңай бөлініп алынады.**

Адсорбент	Бояғыш	Нәтиже / ерекшелігі
SWCNTs	Acid Blue 92	99,4%, 75 мин, pH 3
Функционалданған CNTs	Methylene Blue	Химиялық және физикалық адсорбция
TG–карбоксил-CNT гидрогелі	Methylene Blue	80%; электростатикалық, сутектік және π–π әрекеттесулер
Функционалданған MWCNTs	Ismate Violet 2R	85,9%, 10 мин, pH 4
PANI–MWCNTs	Methyl Orange	Композит жеке компоненттерден тиімді
4-аминсалицил қышқылды MWCNTs	Crystal Violet	99%, 1 мин; 250 циклден кейін қасиеті сақталған
Магниттік WS_2/Fe_3O_4/CNT	Amaranth, Brilliant Blue FCF	Оңтайлы жағдайда 100% жою
Co@CoO/NC	Rhodamine B	679,56 мг/г
Аспарагин-функционалданған MWCNTs	Malachite Green, Methylene Blue	637 және 500 мг/г; тепе-теңдік 3–5 мин

CNT арқылы пестицидтер мен гербицидтерді жою

• Пестицидтер мен гербицидтер ауыл шаруашылығында кең қолданылады.
• Кейбір органохлорлы пестицидтер өте тұрақты және **тұрақты органикалық ластағыштарға (ТОЛ)** жатады.
• Топырақтан шайылу нәтижесінде жерүсті және жерасты суларына түсуі мүмкін.

CNT негізіндегі адсорбенттердің тиімділігі:
CNT + MOF → синергиялық әсер → адсорбция тиімділігі жоғары
Ал магниттік CNT-композиттер адсорбентті судан оңай бөліп алуға мүмкіндік береді.

Ластағыш / материал	Нәтиже
Диурон, дихлобенил / MWCNT	Адсорбцияға меншікті бет ауданы мен микрокеуек көлемі күшті әсер етеді
Диурон / тотыққан MWCNT	48,60 мг/г, тотықпаған CNT – 39,59 мг/г; бейтарап және сілтілік ортада тиімді
Диурон / қалдық полипропиленнен алынған MWCNT	40,375 мг/г
Диазинон / MWCNT	15 минутта 100% жою (pH 4 және 7)
Чиптон / UiO-66-NH_2@CNT аэрогелі	227,3 мг/г, адсорбентті 5 рет қайта қолдануға болады
8 органофосфорлы пестицид / ZIF-8 + магниттік MWCNT	Бір мезгілде бірнеше пестицидті жою; электрон алмасуы/ортақтасуы арқылы адсорбция
Малатион / MWCNT	100% жою, 30 мин ішінде

CNT арқылы микропластиктерді және мұнайлы ағынды суларды тазарту

1. Микропластиктерді (МП) жою

• Микропластиктер — диаметрі **<5 мм**, суда ұзақ сақталатын тұрақты ластағыштар.
• Олар ауыр металдар, органикалық ластағыштар мен патогендерді жинақтап, қоректік тізбек арқылы экожүйеге қауіп төндіреді.
• **CNT → гидрофобты әрекеттесу арқылы полярсыз МП-ны адсорбциялайды.**
• Функционализацияланған CNT → полярлы МП-ны жоюға мүмкіндік береді.
• **Магниттік CNT (M-CNT)** → Fe_2O_3/Fe_3O_4 нанобөлшектері арқылы полярлы МП-мен әрекеттесу + магниттік бөліп алу.
Нәтиже: PE – **1650**, PET – **1400**, PA – **1100 мг/г**;
300 мин ішінде **5 г/л M-CNT → 5 г/л МП** жойған. 4 циклден кейін тиімділік **80%**.

---

2. Мұнайлы ағынды суларды тазарту

• CNT-тер мұнай/су бөлуге **гидрофобтылығы** және жоғары меншікті бет ауданы арқасында тиімді.
• Функционализация → мұнайды сіңіру және бөлу қасиеттерін басқаруға мүмкіндік береді.
• **CNT мембраналары:** бөлу тиімділігі **>99,95%**.
• **CNT/полиуретан губкасы:** мұнайды өз массасынан **34,9 есе** көп сіңіреді; **150 рет** қайта қолдануға болады.
• **Целлюлоза ацетаты/карбоксилденген MWCNT:** сіңіру сыйымдылығы **7,39–19,84 г/г**.
• CNT губкаларының дизельге қатысты сыйымдылығы **110–143 г/г**.
Қорытынды:
CNT → гидрофобтылық + жоғары адсорбциялық сыйымдылық + қайта қолдану → судағы микропластиктер мен мұнайды тиімді жою.