Д13. Суды және ауаны тазартудағы адсорбция: заманауи шешімдер

Академиялық дәріс

Су тазарту | Ауа тазарту | Адсорбциялық технологиялар

Физика-химиялық негіздер · технологиялық схемалар · ғылыми деректер

Дәрістің мақсаты және мазмұны

Мақсаты

Су және ауа тазартуда адсорбенттерді таңдаудың ғылыми негіздерін, технологиялық іске асыруын және тиімділікті бағалау тәсілдерін түсіндіру.

Бөлім 1

01 Ластағыштар және адсорбция механизмі

Бөлім 2

02 Су тазарту: сорбенттер мен колонналар

Бөлім 3

03 Ауа тазарту: VOC және газдық қоспалар

Бөлім 4

04 Жобалау, регенерация, қауіпсіздік

Бөлім 5

05 Заманауи шешімдер және мысалдар

Дереккөз: WHO (2026); US EPA

Неліктен адсорбция экологиялық технологияларда маңызды?

Су ортасы

• Микроластағыштар: дәрілік заттар, бояғыштар, пестицидтер, PFAS

• Табиғи органикалық заттар, иіс және дәм түзетін компоненттер

• Металдар мен бейорганикалық иондар үшін селективті сорбент қажет

Ауа ортасы

• Ұшпа органикалық қосылыстар (VOC), еріткіш булары, иістер

• Кейбір қышқыл және негіздік газдар үшін арнайы импрегнирленген сорбенттер

• Шаңды бөлу мен газдық адсорбция — әртүрлі операциялар

Жұмыс принципі

Ластағыш молекулалар сұйық немесе газ фазасынан қатты адсорбенттің бетіне ауысады. Сіңіру дәрежесі материалдың химиялық табиғатына, қолжетімді кеуектерге және масса тасымалына тәуелді.

Адсорбция ластағышты жоймай, көп жағдайда бір фазадан екіншісіне жинақтайды; кейін сорбентті басқару қажет.

Дереккөз: WHO GDWQ 2026; EPA

Адсорбциялық тазартудың физика-химиялық негіздері

Негізгі әрекеттесулер

- Дисперсиялық және гидрофобтық әрекеттесулер
- Электростатикалық тартылыс немесе тебілу
- Сутектік байланыстар және π–π әрекеттесу
- Кешен түзу, ион алмасу, арнайы хемосорбция
- Кеуекке өлшемдік сәйкестік және қолжетімділік

Жүйеге әсер ететін параметрлер

- Ерітінді pH және иондық күші
- Температура, еріген органикалық заттар
- Газдағы салыстырмалы ылғалдылық
- Бастапқы концентрация және байланыс уақыты
- Кеуек өлшемдерінің таралуы, бет зарядтары

Дереккөз: Thommes et al., 2015

Су тазартуда қолданылатын негізгі адсорбенттер

Материал	Нысаналы ластағыштар	Артықшылығы	Шектеуі
Активтелген көмір (GAC/PAC)	Органика, иіс, кейбір PFAS	Кең таралған, технологиясы жетілген	Бәсекелес органика; қанығу
Биокөмір және композит	Бояғыштар, кейбір металдар	Қалдық шикізаттан алынуы мүмкін	Қасиеті шикізатқа тәуелді
Цеолит, функционалды минерал	NH_4^+ және кейбір катиондар	Ион алмасу, қолжетімділік	Әр ион үшін селективтілігі бөлек
Темір оксидтері/гидроксидтері	As(V), фосфат және т.б.	Нысаналы беткі комплекстеу	pH, бәсекелес аниондар
MOF/графен негізді композит	Таңдалған органика/иондар	Бет химиясын реттеуге болады	Тұрақтылық, құн, масштабтау

Дереккөз: US EPA; Jais et al., 2024

Ұнтақ және түйіршікті активтелген көмір: PAC және GAC

PAC — ұнтақты көмір

- Суға белгілі доза бойынша енгізіледі
- Араластыру және тұндыру/сүзу кезеңімен бөлінеді
- Қысқа науқан немесе маусымдық жүктеме үшін икемді
- Бөлінген көмір шламын қауіпсіз басқару қажет

GAC — түйіршікті көмір

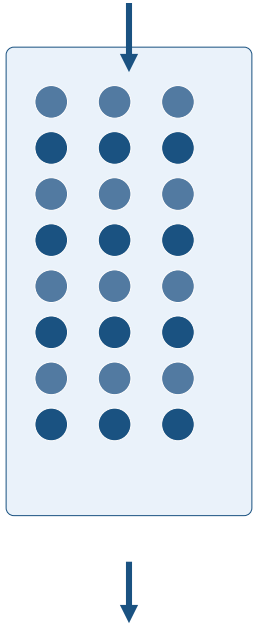
- Қозғалмайтын қабаттағы сорбциялық колонна
- Үздіксіз ағын жағдайында қолдануға ыңғайлы
- Қабаттың шаршауы breakthrough қисығымен анықталады
- Регенерация немесе ауыстыруды талап етеді

Екі технологияның тиімділігі су матрицасына және нақты ластағышқа байланысты; әмбебап «100% тазарту» жоқ.

Дереккөз: US EPA PFAS treatment

Су тазартуға арналған адсорбциялық колоннаның сұлбасы

Шикі су → Алдын ала сүзу → GAC колоннасы → Тазартылған су



Параметрлер

Бос қабаттағы жанасу уақыты EBCT = V_bed/Q; гидравликалық жүктеме, қабат биіктігі, қысым түсуі және шығыс концентрациясы бақыланады.

Негізгі тәуекелдер

Қалқымалы заттар, табиғи органикалық заттар, бәсекелес қоспалар және ерте breakthrough.

Сызба — технологиялық принципті түсіндіруге арналған, нақты өндірістік жоба емес.

Дереккөз: US EPA granular activated carbon

Сұйық фазадағы адсорбциялық сыйымдылық

$$q_e = (C_0 - C_e) \cdot V / m$$

Белгілеулер

C_0 — бастапқы концентрация, мг/л; C_e — тепе-теңдіктегі концентрация, мг/л; V — ерітінді көлемі, л; m — адсорбент массасы, г; q_e — мг/г.

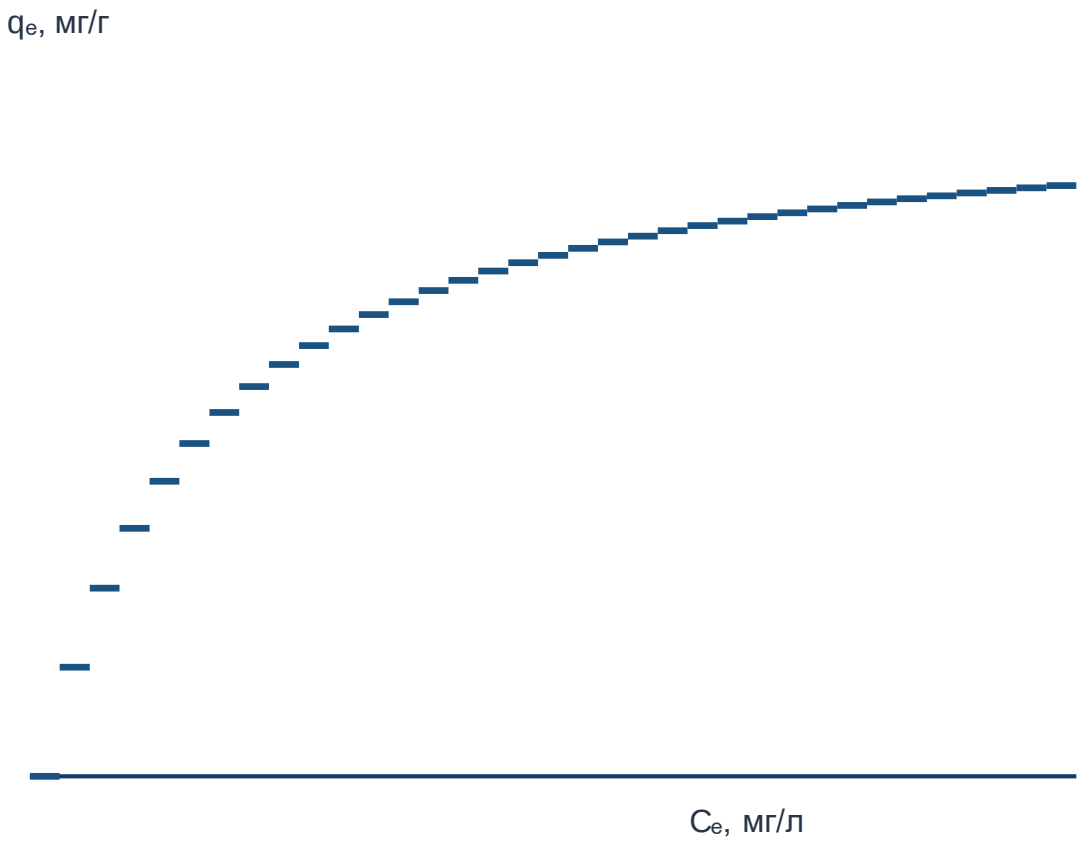
Модельдік есеп

C_0 = 40 мг/л, C_e = 10 мг/л, V = 0,50 л, m = 0,75 г.

q_e = 30 × 0,50 / 0,75 = 20 мг/г.
Жою дәрежесі: η = 75%.

Мысалдағы сандар — оқу мақсатында алынған; зертханалық өлшем ретінде қолданылмайды.

Тепе-теңдік изотермаларының рөлі



Ленгмюр моделі

$q_e = q_{max} K_L C_e /(1 + K_L C_e)$.
Шекті сыйымдылық және біртекті белсенді орталықтар туралы модельдік болжам.

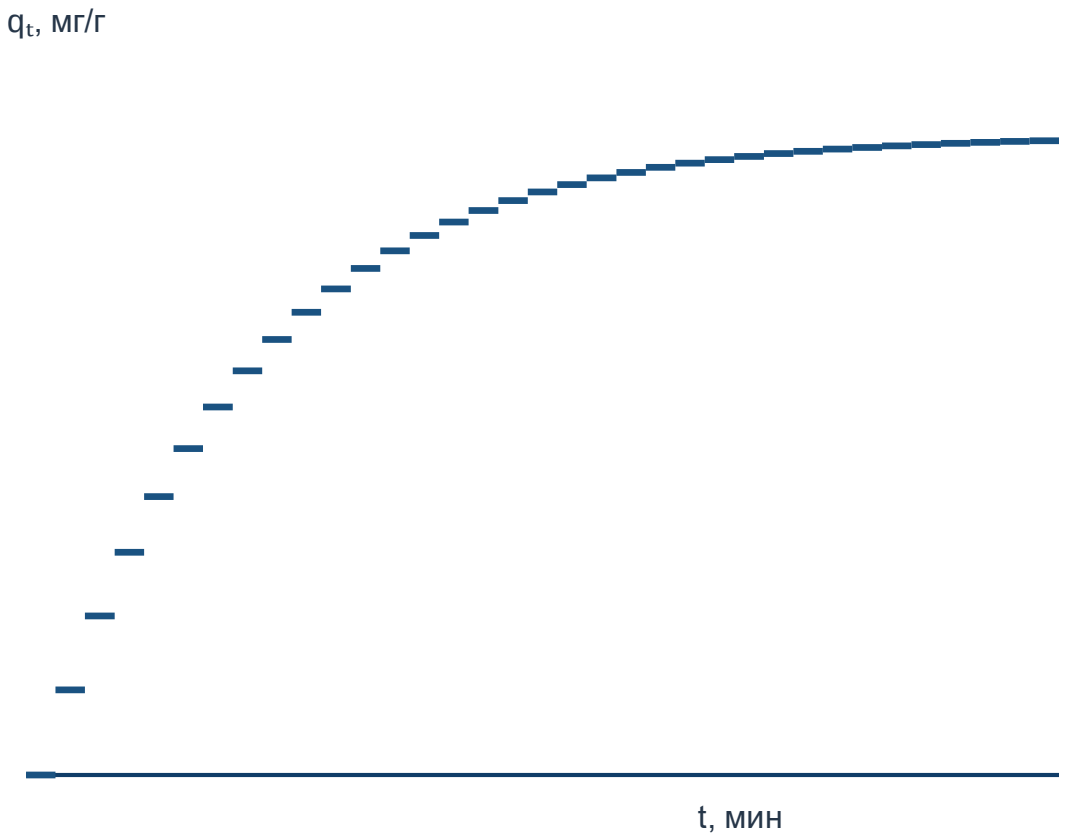
Фрейндлих моделі

$q_e = K_F C_e^{(1/n)}$.
Гетерогенді бетті эмпирикалық сипаттау; жоғары концентрацияда шексіз өсуі физикалық шектеу.

Изотерма сызығы — сұлбалық, тәжірибелік нәтижелер емес.

Дереккөз: Langmuir; Freundlich

Тепе-теңдікке жету жылдамдығы және масса тасымалы

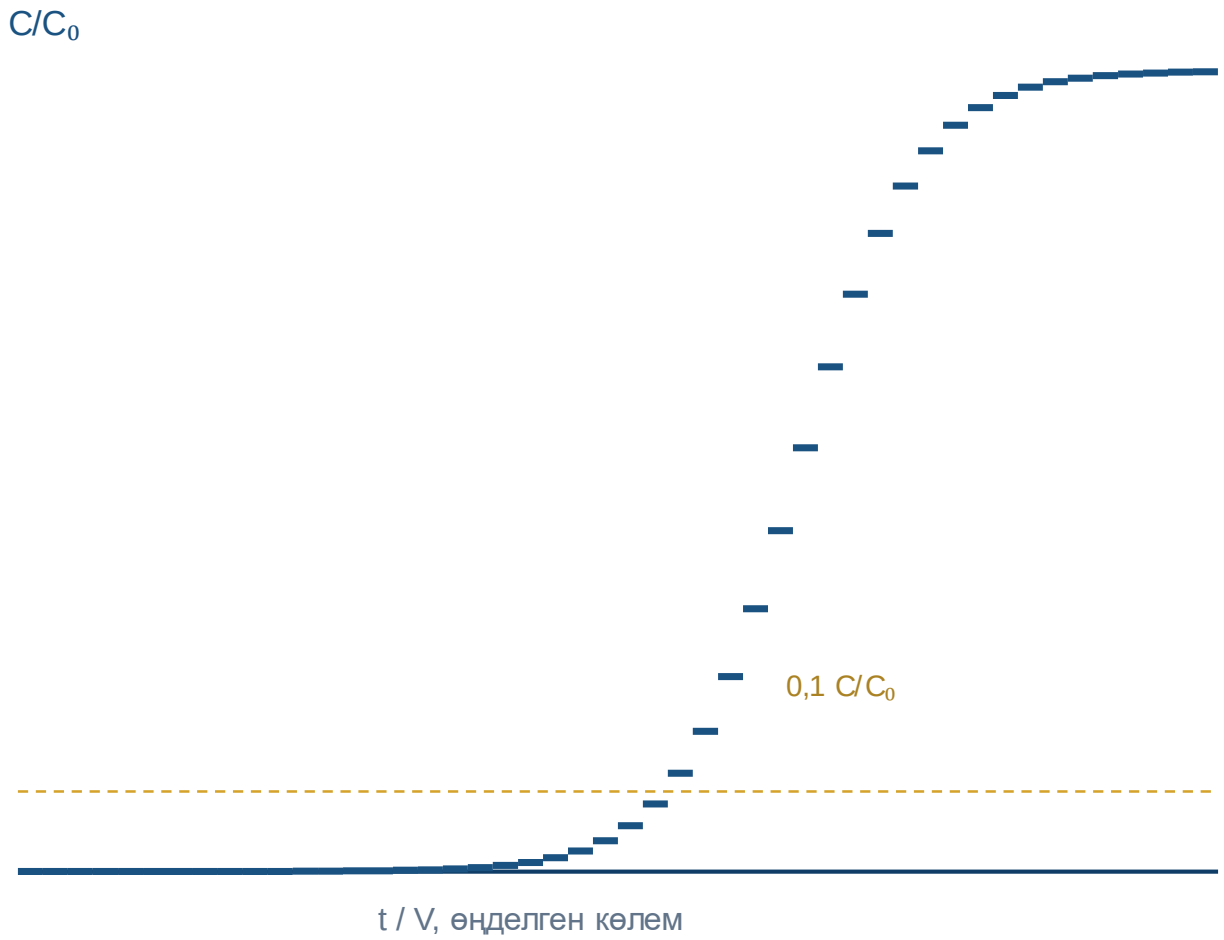


Кинетикалық кезеңдер

- Сұйықтықтың көлемдік ағынынан сыртқы бетке тасымал
- Сұйық қабықша арқылы диффузия
- Кеуекішілік диффузия және бетпен әрекеттесу
- Тепе-теңдікке жақындау

Псевдоекінші ретті модельге жақсы сәйкестік өздігінен хемосорбция дәлелі болмайды.

Колонна жұмысы: breakthrough қисығы



Операциялық түсіндіру

Шығыс концентрациясының кіріс концентрациясына қатынасы C/C_0 уақыт бойынша өседі.

Келісілген шекке жеткен сәт — breakthrough.

Шектің мәні технологиялық талапқа және ластағышқа байланысты.

График — иллюстрациялық; бұрылу нүктесі нақты адсорбент пен су құрамына тәуелді.

Дереккөз: US EPA GAC adsorbers

PFAS жою: технологиялар және шектеулер

Активтелген көмірдің мүмкіндігі

• Кейбір ұзын тізбекті PFAS, соның ішінде PFOA/PFOS үшін тиімді болуы мүмкін

• Қысқа тізбекті PFAS-тың ерте breakthrough қаупі жоғарырақ

• Адсорбент түрі, бос қабаттағы байланыс уақыты және органикалық фон маңызды

Баламалар және интеграция

• Анионалмасу шайырлары

• Жоғары қысымды мембраналар

• Гибридті адсорбция–мембрана сұлбалары

• Қолданылған сорбент пен концентратты басқару — міндетті кезең

PFAS сорбентке жинақталады, сондықтан сорбцияның өзі молекулаларды минералдандырмайды.

Дереккөз: US EPA; Jais et al., 2024; Mian et al., 2025

Бейорганикалық иондар мен металдар адсорбциясы

Ластағыш	Нысаналы материал	Басым механизм	Маңызды фактор
As(V)	FeOOH, Fe_2O_3 негізді композит	Беткі комплекстеу	pH, фосфат
Фосфат	Fe/Al оксиді, функционалды материал	Лиганд алмасу	pH, сульфат
NH_4^+	Табиғи/синтетикалық цеолит	Катион алмасу	Na^+, K^+, Ca^{2+}
Pb^{2+}, Cd^{2+}	Функционалданған көмір/минерал	Комплекстеу, ион алмасу	pH, гидролиз, тұнба

Металдардың кетуін бағалағанда адсорбция мен тұнба түзілуін тәжірибеде ажырату қажет.

Дереккөз: WHO 2026; general surface complexation

Ауа тазартуда қандай ластағыштар басым?

VOC және иіс

Бензол, толуол, ксилол, кейбір еріткіш булары және иісті органикалық заттар.

Адсорбция тиімділігі молекуланың ұшқыштығына және материалға байланысты.

Қышқыл/негіздік газдар

SO_2, H_2S, NH_3 сияқты компоненттер үшін кәдімгі көмір әрдайым жеткіліксіз.

Селективті импрегнирленген сорбенттер немесе реакциялық сіңіру қолданылады.

Шаң және аэрозоль

$PM_{2.5}$, PM_{10}, тозаң және түтін бөлшектері негізінен механикалық сүзгілермен ұсталады.

Газ және бөлшек сүзгілері әртүрлі міндет атқарады.

HEPA сүзгісі газ тәрізді VOC-ты сенімді жояды деп қабылдауға болмайды.

Дереккөз: EPA Indoor Air; EPA Activated Carbon Adsorber

Ауадағы VOC: адсорбциялық сүзгінің принципі



Негізгі бақыланатын көрсеткіштер

- C_in және C_out
- Ауа шығыны Q және қабат биіктігі
- Салыстырмалы ылғалдылық, температура
- Қысым түсуі және регенерация уақыты

Механизм және шектеулер

Таза ауамен өтетін VOC сорбенттің белсенді бетін иеленеді. Қанығу кезінде шығыс концентрациясы өседі. Жоғары ылғалдылық кейбір сорбенттермен бәсекелесе алады.

Ауа сүзгісінің тиімділігі тек көмірдің бар болуына емес, оның массасына, қасиеттеріне және ағынға тәуелді.

Дереккөз: EPA Air Cleaners; EPA CAM

Ауа тазартуға арналған адсорбенттерді салыстыру

Адсорбент	Мақсат	Күшті жағы	Шектеулер
Активтелген көмір	Көптеген органикалық булар	Жетілген технология, жоғары сыйымдылық	Ылғалдылық және регенерация
Цеолит	Кейбір VOC, су буы	Кеуектік селективтілік	Молекула өлшемі, гидрофильділік
Импрегнирленген көмір	Кейбір қышқыл/негіздік газдар	Арнайы химиялық ұстау	Реагенттің жұмсалуы
MOF/гибридтер	Мақсатты газдар	Реттелетін қуыстар мен функция	Құн, ылғалға тұрақтылық, масштабтау

Дереккөз: EPA CAM; EPA Technical Summary

Адсорбциялық тазартуды сандық бағалау

$$\eta = (C_{in} - C_{out})/C_{in} \times 100\%$$

Суды тазарту есебі

Кіріс: 25 мг/л. Шығыс: 5 мг/л.

$\eta = (25 - 5)/25 \times 100\% = 80\%$.

Өнімділік пен сорбенттің жұмыс ресурсы бөлек есептеледі.

Ауаны тазарту есебі

Кіріс: 100 мг/м³. Шығыс: 20 мг/м³.

$\eta = 80\%$.

Бірақ η уақыт өте өзгереді; тұрақты тиімділік деп есептеуге болмайды.

Мысалдар — оқу есептері. Өлшем бірліктері бірдей болғанда ғана тікелей салыстыруға болады.

Қазіргі инженерлік шешімдер: гибридті технологиялар

Су: коагуляция

Қалқыма/коллоидты жою

→

Алдын ала сүзу

Бітелу қаупін азайту

→

GAC / ион алмасу

Нысаналы қоспаны ұстау

→

Мембрана / соңғы тазалау

Қажет сапа деңгейі

Жүйелік тәсіл

Алдын ала тазарту адсорбент ресурсін арттыра алады; соңғы мембраналық кезең мақсатты сапаны тұрақтандыруы мүмкін. Әр блоктың қажеттілігі бастапқы су құрамымен және нормативтік мақсатпен анықталады.

Дереккөз: WHO 2026; EPA PFAS treatment

Заманауи адсорбенттер: мүмкіндіктер мен қиындықтар

Бағыт	ғылыми мүмкіндік	Негізгі зерттеу сұрағы
Модификацияланған биокөмір	Бет функционалын реттеу	Көпкомпонентті судағы тұрақтылық
Графен оксиді композиттері	Металдар мен органикаға функционалдық топтар	Қайта бөліну және материалдың ағуы
MOF/COF сорбенттері	Қуыстар мен селективті орталықтарды жобалау	Су/ылғал әсері, регенерация
Магнитті сорбенттер	Адсорбентті магнитпен бөлу	Магнитті бөлшектің шайылуы
Гибрид адсорбция–катализ	Концентрлеу + кейінгі түрлендіру	Аралық өнімдер және толық минералдану

Дереккөз: Water 2026, 18, 300; Mian et al., 2025

Адсорбентті регенерациялау және қалдықтарды басқару

Регенерация тәсілдері

- Термиялық десорбция, бу, вакуум
- Еріткішпен немесе pH өзгерту арқылы десорбция
- Кейбір сорбенттер үшін химиялық қалпына келтіру
- Қайта қолданғаннан кейін сыйымдылықтың төмендеуін бақылау

Тұрақтылық және қауіпсіздік

- Регенерация ағынының ластағыш құрамын бақылау
- PFAS секілді тұрақты заттар үшін арнайы басқару
- Материалдың шайылуы мен екінші реттік ластану
- Энергия, су және реагент шығындарын есепке алу

Сорбентті қалпына келтіру ластағыштың ыдырауына міндетті түрде әкелмейді.

Дереккөз: US EPA; Andrunik & Smol 2025

Зертханалық зерттеу жоспары: су және ауа

Кезең	Су адсорбциясы	Ауа адсорбциясы
1. Бастапқы талдау	pH, C_0, DOC, иондық құрам	VOC құрамы, ылғалдылық, T
2. Материал талдауы	BET, pH_pzc, FTIR, SEM	BET, кеуек өлшемі, FTIR
3. Бақыланатын шарт	m, V, уақыт, араластыру	Q, қабат биіктігі, температура
4. Бақылау	Бос сынама, қайталау, аналитика	Бос колонна, шығу қисығы
5. Нәтиже	q_e, η, кинетика, изотерма	C_out/C_in, breakthrough, ресурс

Дереккөз: Үлгілік зерттеу хаттамасы

Мысал: адсорбентті таңдаудағы шешім ағашы

Қандай фаза?	Су / ауа
Ластағыш түрі	Органика / ион / газ
Материалды таңдау	Көмір / цеолит / арнайы сорбент
Пилоттық сынақ	Нақты ортадағы breakthrough
Технологиялық шешім	Жүйе, регенерация, мониторинг

Қолдану шектеулері және жиі кездесетін қателер

Болдырмау қажет

• Бір ластағыш бойынша нәтижені барлық қоспаға тарату

• BET ауданы көп болса, сыйымдылық міндетті түрде жоғары деу

• Шайылу немесе тұнба түзілуін адсорбция деп қабылдау

• Бастапқы тиімділікті колоннаның бүкіл ресурсына телу

Дәлелдеуге тиіс

• Нақты матрицада қоспалардың бәсекелесу әсері

• Қайталаулар, аналитикалық QA/QC, массалық баланс

• Регенерациядан кейінгі циклдік тұрақтылық

• Қоршаған орта және экономикалық өмірлік цикл

Дереккөз: IUPAC; EPA; WHO

Қорытынды: негізгі ғылыми тұжырымдар

1. Адсорбция су мен ауадағы әртүрлі ластағыштарды селективті ұстауға мүмкіндік береді.

2. GAC/PAC — су тазартуда; көмір және арнайы сорбенттер — газдық ауа тазартуда маңызды.

3. Нәтиже тек материалдың BET ауданына емес, бет химиясына, диффузияға және орта жағдайына тәуелді.

4. Колонна үшін breakthrough уақыты мен жұмыс сыйымдылығы — практикалық негізгі өлшемдер.

5. Заманауи композиттер перспективалы, бірақ регенерация, құн және тұрақтылық міндетті бағаланады.

Дереккөз: WHO 2026; US EPA; рецензияланған шолулар

Бақылау сұрақтары және тапсырмалар

Сұрақтар

• Судағы органикалық заттарға GAC пен PAC қалай таңдалады?

• PFAS-тың қысқа тізбекті түрлері неліктен қиын ұсталады?

• Ауа сүзгісінде HEPA мен көмір қабатының айырмашылығы қандай?

• Breakthrough қисығы нені сипаттайды?

• Адсорбенттің регенерациясы кезінде қандай тәуекел туындайды?

Тәжірибелік тапсырма

Су: C_0=60 мг/л, C_e=12 мг/л, V=0,25 л, m=0,40 г.

1) η есептеңіз.
2) q_e есептеңіз.
3) Нәтижені бірліктерімен беріңіз.

Жауабы: η=80%; q_e=30 мг/г.

Негізгі ғылыми әдебиеттер және ресурстар

1. WHO. Guidelines for drinking-water quality, 4th ed. incl. 3rd addendum (2026). who.int/publications/i/item/9789240121225

2. US EPA. Reducing PFAS in Drinking Water with Treatment Technologies. epa.gov/sciencematters/reducing-pfas-drinking-water-treatment-technologies

3. US EPA. Monitoring by Control Technique: Activated Carbon Adsorber. epa.gov/air-emissions-monitoring-knowledge-base/monitoring-control-technique-activated-carbon-adsorber

4. US EPA. Guide to Air Cleaners in the Home. epa.gov/indoor-air-quality-iaq/guide-air-cleaners-home

5. Jais F.M. et al. Updated review on PFAS removal using activated carbon. J. Water Process Eng. 64 (2024) 105625. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105625

6. Mian M.M. et al. Activated carbon driven PFAS removal. Front. Environ. Sci. Eng. 19 (2025) 78. DOI: 10.1007/s11783-025-1998-3

7. Andrunik M., Smol M. Life After Adsorption: PFAS Adsorbent Regeneration. Water 17 (2025) 2813. DOI: 10.3390/w17192813

8. Thommes M. et al. Physisorption of gases (IUPAC). Pure Appl. Chem. 87 (2015) 1051–1069. DOI: 10.1515/pac-2014-1117

9. Adsorption and Removal of Emerging Pollutants from Water by Activated Carbon. Water 18 (2026) 300. DOI: 10.3390/w18030300