



Нанотехнології в захисті навколишнього середовища (ПВ07)

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	18 Виробництво та технології
Спеціальність	183 Технології захисту навколишнього середовища
Освітня програма	Технології захисту навколишнього середовища та гуманітарне розмінювання
Статус дисципліни	Вибіркова
Форма навчання	Очна (денна)
Рік підготовки, семестр	3 курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	4 кредити ЕКТС Лекції – 32 год, практики – 16 год, самостійна робота студента (СРС) – 72 год.
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Залік/ Модульна контрольна робота (МКР)
Розклад занять	https://schedule.kpi.ua/
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: к. т. н., доцент Гребенюк Тетяна Володимирівна, t.hrebeniuk07@gmail.com , 0679416841; Практичні/Семінарські: к. т. н., доцент Гребенюк Тетяна Володимирівна, t.hrebeniuk07@gmail.com , 0679416841; Консультації: вівторок 16:00-17:00, 202-22.
Розміщення курсу	Доступний на платформі «Сікорський». Код доступу надається викладачем на першому занятті.

Програма навчальної дисципліни

1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Дисципліна «Нанотехнології в захисті навколишнього середовища» спрямована на формування знань про сучасні наноматеріали, наноструктури та нанотехнологічні підходи, що застосовуються для очищення води, повітря і ґрунтів, ремедіації забруднених територій, екологічного моніторингу та зниження техногенного навантаження на довкілля. Під час вивчення дисципліни здобувачі опановують властивості, методи одержання та модифікації наноматеріалів, принципи використання наносорбентів, наномембран, нанокаталізаторів, фотокаталітичних і сенсорних систем, а також оцінюють ефективність і екологічну безпеку їх застосування у природоохоронних технологіях.

Метою дисципліни є посилення у здобувачів наступних компетентностей, зазначених в освітній програмі:

ФК04 Здатність здійснювати контроль за забрудненням повітряного басейну, водних об'єктів, ґрунтового покриву та геологічного середовища;

ФК08 Здатність до забезпечення екологічної безпеки;

ФК09 Здатність оцінювати вплив промислових об'єктів та інших об'єктів господарської діяльності на довкілля.

Зазначені компетентності посилюють такі результати навчання:

ПРН10 Вміти застосувати знання з контролю та оцінювання стану забруднення і промислових викидів, з аналізу динаміки їх зміни в залежності від умов та технологій очищення компонентів довкілля;

ПРН11 Вміти застосувати знання з вибору та обґрунтування методів та технологій збирання, сортування, зберігання, транспортування, видалення, знешкодження і переробки відходів виробництва й споживання; оцінювати їх вплив на якісний стан об'єктів довкілля та умови проживання і безпеку людей;

ПРН14 Вміти обґрунтовувати ступінь відповідності наявних або прогнозованих екологічних умов завданням захисту, збереження та відновлення навколишнього середовища.

Предмет дисципліни – властивості, способи одержання, модифікації та застосування наноматеріалів і нанотехнологій у системах захисту навколишнього середовища, очищення природних і стічних вод, атмосферного повітря та ґрунтів, екологічного моніторингу, ремедіації забруднених територій, ресурсозбереження та забезпечення екологічної безпеки, а також оцінювання потенційних екологічних ризиків, пов'язаних із використанням наноматеріалів.

2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)

Здобуті упродовж опанування дисципліни компетентності і програмні результати навчання використовуються у подальшому при проходженні здобувачами вищої освіти переддипломної практики та є підґрунтям для виконання дипломної роботи.

3. Зміст навчальної дисципліни

Тема 1. Вступ до нанотехнологій у захисті навколишнього середовища

Тема 2. Класифікація та властивості наноматеріалів

Тема 3. Методи одержання та модифікації наноматеріалів

Тема 4. Методи дослідження та характеристики наноматеріалів

Тема 5. Наносорбенти для очищення води та стічних вод

Тема 6. Наномембранні технології у водоочищенні та водопідготовці

Тема 7. Фотокаталітичні нанотехнології очищення довкілля

Тема 8. Нанотехнології очищення атмосферного повітря

Тема 9. Нанотехнології ремедіації забруднених ґрунтів і підземних вод

Тема 10. Вуглецеві наноматеріали у природоохоронних технологіях

Тема 11. Магнітні наноматеріали та їх застосування в екології

Тема 12. Наносенсиори та нанобіосенсиори в екологічному моніторингу

Тема 13. Нанотехнології в управлінні відходами та ресурсозбереженні

Тема 14. Екотоксикологія та екологічна безпека наноматеріалів

Тема 15. Оцінка життєвого циклу наноматеріалів і нанопродукції

Тема 16. Перспективи розвитку нанотехнологій у захисті довкілля

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література

1. *Nanotechnology for Environmental Remediation* / ed. by S. Thomas, M. S. Thomas, L. A. Pothen. Wiley-VCH, 2022. DOI: 10.1002/9783527834143. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527834143>
2. *Nano-biotechnology for Waste Water Treatment: Theory and Practices* / ed. by J. P. N. Rai, S. Saraswat. Cham : Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-00812-2. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-00812-2>
3. *Nanotechnology: Applications for Environmental Protection and Sustainability* / ed. by M. F. Desimone, R. B. Jotania, R. B. Khomane, R. G. Chaudhary. Cham : Springer, 2025. DOI: 10.1007/978-3-031-86508-4. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-86508-4>
4. Брошко О. С. Створення та дослідження нанокомполімерних мембран на основі природних полімерів : магістерська дис. : 161 Хімічні технології та інженерія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 87 с. URL:
5. Голяка А. В. Нові матеріали та процеси в ресурсоефективних технологіях водоспоживання у промисловості : дис. д-ра філософії : 101 Екологія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 188 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/51bc17eb-61f6-4a3e-a183-7cdd5db651fa>

Допоміжна література

1. Демченко В., Штомпель В., Овсянкіна В., Брошко О., Крусенко Т., Юрженко М., Романюкіна І. X-RAY structural study of membranes based on Na-CMC and CS-Cl for water purification. Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2024. № 1 (23). С. 76–85. DOI: 10.20535/2617-9741.1.2024.300994. URL: <https://ela.kpi.ua/items/6572592c-9d0c-443f-ab79-d997f3e5caff>
2. Dutta S., Sinelshchikova A., Andreo J., Wuttke S. Nanoscience and nanotechnology for water remediation: an earnest hope toward sustainability. *Nanoscale Horizons*. 2024. Vol. 9. P. 885–899. DOI: 10.1039/D4NH00056K. URL: <https://pubs.rsc.org/nh/article-abstract/9/6/885/856516/Nanoscience-and-nanotechnology-for-water>
3. Wiesner M. R. et al. Trends, risks and opportunities in environmental nanotechnology. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2024. Vol. 5. P. 572–587. URL: <https://www.nature.com/articles/s43017-024-00567-5>
4. Sathish T., Ahalya N., Thirunavukkarasu M., Senthil T. S., Hussain Z., Siddiqui M. I. H., Panchal H., Sadasivuni K. K. A comprehensive review on the novel approaches using nanomaterials for the remediation of soil and water pollution. *Alexandria Engineering Journal*. 2024. Vol. 86. P. 373–385. DOI: 10.1016/j.aej.2023.10.038. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.038>
5. Adabi S., Yazdanbakhsh A., Shahsavani A. Removal of heavy metals from the aqueous solution by nanomaterials: a review with analysing and categorizing the studies. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2023. Vol. 21, № 2. P. 305–318. DOI: 10.1007/s40201-023-00863-0. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10584792/>
6. Rajput V. D., Minkina T., Upadhyay S. K., Kumari A., Ranjan A., Mandzhieva S., Sushkova S., Singh R. K., Verma K. K. Nanotechnology in the restoration of polluted soil. *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12, № 5. Art. 769. DOI: 10.3390/nano12050769. URL: <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/5/769>
7. Elsayed M. E. A., Ayoub H. A., Helal M. I. D., Sang W., Shen Z., Abdelhafeez I. A. Nanotechnology-enabled soil management for sustainable agriculture: interactions, challenges, and prospects. *Environmental Science: Nano*. 2025. Vol. 12. P. 2128–2153.

Обов'язковим для прочитання є окремі розділи базової літератури [1]–[5]. Усі інші літературні джерела є факультативними, з ними рекомендується ознайомитись.

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Вивчення дисципліни «Нанотехнології в захисті навколишнього середовища» здійснюється із застосуванням традиційних, інтерактивних та практико-орієнтованих методів навчання, спрямованих на формування системних знань про властивості, способи одержання та напрями застосування наноматеріалів у природоохоронних технологіях, а також навичок оцінювання ефективності й екологічної безпеки їх використання.

Лекційні заняття проводяться із застосуванням словесних і наочних методів навчання, мультимедійних презентацій, схем, таблиць, графічних матеріалів, аналізу сучасних технологічних рішень, а також проблемно-орієнтованого та частково-пошукового підходів.

Практичні заняття передбачають аналіз властивостей і сфер застосування наноматеріалів, розрахунок ефективності наносорбційного очищення, порівняння наномембранних і фотокаталітичних технологій, вибір наноматеріалів для очищення води та ремедіації забруднених територій, а також оцінювання екологічних ризиків їх застосування.

Самостійна робота здобувачів включає опрацювання навчальної та наукової літератури, підготовку до лекційних і практичних занять, виконання індивідуальних завдань та підготовку до контрольних заходів.

Контроль результатів навчання здійснюється шляхом поточного, календарного та семестрового контролю відповідно до рейтингової системи оцінювання (PCO).

Лекційні заняття

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (посилання на літературу)
Лекція 1	Вступ до нанотехнологій у захисті навколишнього середовища Поняття нанотехнологій і наноматеріалів. Масштаб наночастинок. Основні напрями застосування нанотехнологій у природоохоронній діяльності. Переваги та обмеження.
Лекція 2	Класифікація та властивості наноматеріалів Вуглецеві, металеві, оксидні, полімерні, композитні та природні наноматеріали. Розмірний ефект, питома поверхня, реакційна здатність, оптичні, електричні та сорбційні властивості.
Лекція 3	Методи одержання та модифікації наноматеріалів Підходи «зверху вниз» і «знизу вгору». Фізичні, хімічні та біологічні методи синтезу. Функціоналізація поверхні. «Зелені» методи синтезу наночастинок.
Лекція 4	Методи дослідження та характеристики наноматеріалів Визначення розміру, морфології, структури та поверхневих властивостей наноматеріалів. Електронна мікроскопія, спектроскопічні та дифракційні методи, аналіз питомої поверхні.
Лекція 5	Наносорбенти для очищення води та стічних вод Механізми адсорбції. Наноматеріали для вилучення важких металів, нафтопродуктів, барвників, органічних сполук та інших забруднювачів. Регенерація сорбентів.
Лекція 6	Наномембранні технології у водоочищенні та водопідготовці Нанофільтрація, ультрафільтрація, мембрани з нанокомпозитними матеріалами. Видалення солей, важких металів, мікрозабруднювачів і мікроорганізмів.
Лекція 7	Фотокаталітичні нанотехнології очищення довкілля Основи фотокаталізу. Наночастишки TiO_2 , ZnO та інших фотокаталізаторів. Руйнування стійких органічних забруднювачів у воді та повітрі.
Лекція 8	Нанотехнології очищення атмосферного повітря Наноструктуровані фільтри, каталізатори та сорбенти. Видалення пилу, газоподібних забруднювачів, летких органічних сполук і токсичних компонентів.
Лекція 9	Нанотехнології ремедіації забруднених ґрунтів і підземних вод

	Наночастинки нульвалентного заліза, магнітні наноматеріали, нанокompозити. Імобілізація та руйнування забруднювачів. In situ та ex situ технології.
Лекція 10	Вуглецеві наноматеріали у природоохоронних технологіях Графен, оксид графену, вуглецеві нанотрубки, нанопористі вуглецеві матеріали. Застосування в сорбції, мембранних технологіях, сенсориці та очищенні води.
Лекція 11	Магнітні наноматеріали та їх застосування в екології Магнітні наночастинки заліза та феритів. Видалення забруднювачів із води. Магнітне розділення, регенерація, повторне використання наноматеріалів.
Лекція 12	Наносенсори та нанобіосенсори в екологічному моніторингу Принципи роботи наносенсорів. Виявлення важких металів, газів, пестицидів, токсичних органічних сполук і біологічних забруднювачів. Портативні та автоматизовані системи контролю.
Лекція 13	Нанотехнології в управлінні відходами та ресурсозбереженні Наноматеріали для перероблення і знешкодження відходів. Використання вторинної сировини для синтезу наноматеріалів. Нанотехнології у циркулярній економіці.
Лекція 14	Екотоксикологія та екологічна безпека наноматеріалів Шляхи потрапляння наночастинок у довкілля. Мобільність, трансформація, біоаккумуляція та токсичність. Вплив на водні організми, ґрунтову біоту, рослини та людину.
Лекція 15	Оцінка життєвого циклу наноматеріалів і нанопродукції Життєвий цикл наноматеріалів: синтез, використання, утилізація. Оцінка ресурсних та енергетичних витрат. Екологічні ризики на різних етапах життєвого циклу.
Лекція 16	Перспективи розвитку нанотехнологій у захисті довкілля Smart-наноматеріали, багатофункціональні нанокompозити, зелені нанотехнології, інтеграція наносенсорів із GIS та автоматизованим моніторингом. Перспективи застосування нанотехнологій у повоєнному відновленні забруднених територій.

Практичні заняття

№ з/п	Завдання, які виносяться на практичні заняття
Практичне заняття 1	Вибір наноматеріалу для очищення забруднених вод Обрати та обґрунтувати наноматеріал для видалення заданої забруднювальної речовини з води з урахуванням його властивостей, ефективності та екологічної безпеки.
Практичне заняття 2	Розрахунок ефективності наносорбційного очищення води Розрахувати ступінь очищення води та сорбційну ємність наносорбенту за заданими вихідними даними.
Практичне заняття 3	Порівняння наномембранних технологій очищення води Порівняти основні мембранні технології та обґрунтувати вибір найбільш доцільної для заданого складу забрудненої води.
Практичне заняття 4	Розроблення технологічної схеми нанофотокаталітичного очищення Розробити технологічну схему очищення води або повітря із застосуванням нанофотокаталізатора та обґрунтувати основні етапи процесу.
Практичне заняття 5	Застосування нанотехнологій для ремедіації забруднених ґрунтів Обрати та обґрунтувати нанотехнологію для відновлення ґрунту, забрудненого заданим видом забруднювальної речовини.
Практичне заняття 6	Оцінювання екологічної безпеки застосування наноматеріалів Визначити можливі шляхи надходження наноматеріалу в довкілля, оцінити потенційні екологічні ризики та запропонувати заходи їх мінімізації.
Практичне заняття 7	Обґрунтування нанотехнологій для вирішення екологічної проблеми Розробити комплексне нанотехнологічне рішення для заданої екологічної проблеми та оцінити його ефективність, переваги й можливі екологічні ризики.

Практичне заняття 8	Модульна контрольна робота
----------------------------	-----------------------------------

6. Самостійна робота студента/аспіранта

Самостійна робота студента передбачає:

підготовку до лекцій – 16 год;

підготовку до практичних занять – 14 год;

підготовку до модульної контрольної роботи – 4 год;

самостійне опрацювання додаткових тем – 32 год;

підготовку до заліку – 6 год.

Додаткові теми на самоопрацювання

Кількість годин	Назва теми
8 годин	Зелений синтез наноматеріалів та його екологічні переваги.
8 годин	Нанотехнології для очищення води від важких металів.
8 годин	Екотоксичність і екологічні ризики наночастинок.
8 годин	Перспективи застосування нанотехнологій у ремедіації забруднених територій.

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

На момент проведення кожного заняття, як лекційного, так і практичного, у студента на пристрої, з якого він працює, має бути встановлено додаток Zoom, а також відкрито курс «Нанотехнології в захисті навколишнього середовища» на платформі «Сікорський» (код доступу до курсу надається на першому занятті згідно з розкладом). Заняття згідно з розкладом проводяться за допомогою додатку Zoom (за умови дистанційного навчання). Силабус; лекційний матеріал; завдання до кожного практичного заняття; варіанти модульної контрольної роботи; питання, які потрібно виконати за лекційним матеріалом; варіанти залікової роботи розміщено на платформі «Сікорський» та у системі «Електронний Кампус КПІ».

Під час проходження курсу «Нанотехнології в захисті навколишнього середовища» студенти зобов'язані дотримуватись загальних моральних принципів та правил етичної поведінки, зазначених у Кодексі честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

За участь у Всеукраїнській олімпіаді (конкурсі наукових робіт) екологічного спрямування студенту нараховується 5 (I тур) або 10 (II тур) балів. За написання статті екологічного спрямування та її публікацію студенту нараховується 12 балів (видання, що входить до Scopus або Web of Science) або 8 балів (фахове видання України). За публікацію тез доповіді на науковій конференції – 4 бали.

Дедлайни виконання кожного завдання зазначено у курсі «Нанотехнології в захисті навколишнього середовища» на платформі «Сікорський».

Усі без виключення студенти зобов'язані дотримуватись вимог Положення про систему запобігання плагиату, фабрикації, фальсифікації в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Поточний контроль: опитування у вигляді письмових відповідей на питання після прослухання кожних 5-ти лекцій (16 лекцій - 3 опитування × 10 балів = 30 балів), завдання в рамках практичного заняття (7 практичних робіт × 6 балів = 42 балів), МКР (проводиться на практичному занятті, 28 балів).

Опитування по лекційному матеріалу проводиться наприкінці кожної 5-ї лекції та складається з 10 коротких питань (на вибір) з самоконтролю, що містяться в кінці кожної лекції.

Кожна правильна відповідь оцінюється в 1 бал. Отже максимальний бал становить 10 балів. Всього опитувань 3 по кожному п'ятьом лекціям.

Завдання в рамках практичного заняття оцінюється в 6 балів за такими критеріями:

«відмінно» – повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації), надані відповідні обґрунтування та особистий погляд – 6 балів;

«добре» – достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації), що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь» або містить незначні неточності – 5 балів;

«задовільно» – неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації), виконана згідно з вимогами до «стереотипного» рівня та містить деякі помилки – 4 бали;

«незадовільно» – незадовільна відповідь – 0 балів.

Модульна контрольна робота складається з 20-ти тестових питань, які оцінюються в 1 бал та розв'язання кейсу в 8 балів:

– аналіз та розкриття проблеми — 8 - 7 балів;

– проблема встановлена, але без належної глибини — 6 - 5 балів;

– часткове розкриття — 4 - 3 бали;

– тема не розкрита — 0 балів.

МКР вважається зарахованою, якщо здобувач вищої освіти набрав 60 % максимально можливих балів, тобто 17 балів. Для тих здобувачів вищої освіти, що не змогли виконати її вчасно, назначається окремий час в кінці семестру.

Календарний контроль: проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу. Умовою позитивного першого та другого календарного контролів є отримання не менше 50 % максимально можливого на момент відповідного календарного контролю рейтингу.

Семестровий контроль: залік.

Умови допуску до семестрового контролю: мінімальний рейтинг більше 50% від максимально можливого на момент семестрового контролю, в тому числі виконана і зарахована МКР.

Студенти, які виконали всі умови допуску до заліку та мають рейтингову оцінку 60 і більше балів, отримують відповідну до набраного рейтингу оцінку без додаткових випробувань. Сума рейтингових балів, отриманих студентом протягом семестру, переводиться до підсумкової оцінки згідно з таблицею.

Якщо сума балів менша за 60, але виконані умови допуску до семестрового контролю, студент виконує залікову контрольну роботу. Сума балів за залікову контрольну роботу переводиться до підсумкової оцінки згідно з таблицею.

Студент, який у семестрі отримав більше 60 балів, але бажає підвищити свій результат, може взяти участь у заліковій контрольній роботі. Після виконання залікової контрольної роботи, якщо оцінка за залікову контрольну роботу більша ніж за рейтингом, здобувач отримує оцінку за результатами залікової контрольної роботи. Якщо оцінка за залікову контрольну роботу менша ніж за рейтингом, здобувач отримує оцінку за рейтингом.

Залікова контрольна робота оцінюється у 100 балів. Контрольне завдання цієї роботи складається з двох теоретичних запитань з переліку, що наданий у додатку до силабусу, та кейсу.

Кожне теоретичне запитання оцінюється у 30 балів за такими критеріями:

«відмінно» – повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації), надані відповідні обґрунтування та особистий погляд – 30 – 27 балів;

«добре» – достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації), що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь» або містить незначні неточності – 26 – 23 бали;

«задовільно» – неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації), виконана згідно з вимогами до «стереотипного» рівня та містить деякі помилки – 22 – 18 балів;

«незадовільно» – незадовільна відповідь – 0 балів.

Розв'язання кейсу у 40 балів за такими критеріями:

«відмінно» – повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації), надані відповідні обґрунтування та особистий погляд – 40 – 36 балів;

«добре» – достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації), що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь» або містить незначні неточності – 35 – 30 балів;

«задовільно» – неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації), виконана згідно з вимогами до «стереотипного» рівня та містить деякі помилки – 29 – 24 бали;

«незадовільно» – незадовільна відповідь – 0 балів.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

<i>Кількість балів</i>	<i>Оцінка</i>
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль, розміщено у дистанційному курсі.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено доценткою кафедри геоінженерії, к.т.н., доценткою Гребенюк Тетяною Володимирівною.

Ухвалено кафедрою геоінженерії (протокол № 13 від 26 червня 2026 року).

Погоджено навчально-методичною комісією НН ІЕЕ (протокол № 43 від 29 червня 2026 року).

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль

1. Охарактеризуйте місце нанотехнологій у сучасній системі захисту навколишнього середовища. Проаналізуйте основні напрями їх застосування, переваги порівняно з традиційними природоохоронними технологіями та обмеження практичного впровадження.
2. Поясніть, як зміна розмірів матеріалу до наномасштабу впливає на його фізико-хімічні властивості. Розкрийте значення питомої поверхні, поверхневої енергії, реакційної здатності та квантово-розмірних ефектів для екологічних технологій.
3. Проведіть порівняльну характеристику основних класів наноматеріалів, що використовуються у захисті довкілля. Проаналізуйте вуглецеві, металеві, оксидні, полімерні, магнітні та композитні наноматеріали з позицій ефективності, стабільності, вартості й екологічної безпеки.
4. Проаналізуйте взаємозв'язок між структурою, морфологією та функціональними властивостями наноматеріалів. Наведіть приклади того, як форма, розмір і структура частинок впливають на сорбцію, каталіз, мембранне розділення та сенсорні властивості.
5. Порівняйте підходи "top-down" і "bottom-up" до одержання наноматеріалів. Оцініть їх переваги, недоліки, енергетичні витрати, можливості масштабування та екологічні наслідки.
6. Охарактеризуйте фізичні, хімічні та біологічні методи синтезу наноматеріалів. Поясніть, за яких умов доцільно застосовувати кожен групу методів у природоохоронних технологіях.
7. Розкрийте сутність "зеленого синтезу" наноматеріалів. Оцініть можливість використання рослинних екстрактів, мікроорганізмів і біополімерів для одержання наночастинок та проаналізуйте екологічні переваги і потенційні обмеження цього підходу.
8. Проаналізуйте основні методи характеристикації наноматеріалів. Поясніть, яку інформацію можна отримати за допомогою електронної мікроскопії, рентгенівської дифракції, спектроскопічних методів, аналізу питомої поверхні та інших методів.
9. Обґрунтуйте, які властивості наноматеріалу необхідно досліджувати перед його використанням у природоохоронній технології. Поясніть взаємозв'язок між характеристиками матеріалу, ефективністю очищення та екологічною безпекою.
10. Проаналізуйте механізми застосування наносорбентів для очищення води. Розкрийте роль фізичної адсорбції, хемосорбції, іонного обміну, комплексоутворення та електростатичних взаємодій.
11. Порівняйте ефективність різних типів наносорбентів для вилучення важких металів із води. Оцініть вплив рН, температури, часу контакту, дози сорбенту та початкової концентрації забруднювача.
12. Проаналізуйте методичні підходи до оцінки ефективності наносорбційного очищення води. Поясніть значення ступеня очищення, сорбційної ємності, кінетики процесу та можливості регенерації матеріалу.
13. Охарактеризуйте переваги й недоліки використання вуглецевих наноматеріалів у водоочищенні. Порівняйте графен, оксид графену, вуглецеві нанотрубки та нанопористі вуглецеві матеріали.
14. Проаналізуйте можливості застосування магнітних наноматеріалів для очищення води. Поясніть принцип магнітного розділення, особливості регенерації матеріалів та ризики їх потрапляння у довкілля.
15. Розкрийте принципи роботи наномембранних технологій. Порівняйте мікрофільтрацію, ультрафільтрацію, нанофільтрацію і зворотний осмос за механізмом розділення, ефективністю та енергоспоживанням.

16. Проаналізуйте переваги нанокompозитних мембран порівняно з традиційними мембранними матеріалами. Розкрийте роль нанодобавок у підвищенні селективності, гідрофільності, механічної міцності та стійкості до забруднення.
17. Охарактеризуйте проблему fouling мембран у процесах водоочищення. Проаналізуйте механізми його виникнення та сучасні нанотехнологічні підходи до зниження інтенсивності мембранного забруднення.
18. Розкрийте фізико-хімічні основи фотокаталітичного очищення доквілля. Поясніть механізм утворення активних форм кисню та їх роль у руйнуванні органічних забруднювачів.
19. Порівняйте основні нанофотокаталізатори, що використовуються у природоохоронних технологіях. Оцініть TiO_2 , ZnO та модифіковані фотокаталітичні матеріали за активністю, стабільністю, вартістю та можливістю використання сонячного випромінювання.
20. Проаналізуйте фактори, що визначають ефективність фотокаталітичного очищення води й повітря. Розкрийте вплив інтенсивності світла, концентрації каталізатора, pH, складу середовища та структури забруднювача.
21. Охарактеризуйте можливості нанотехнологій у очищенні атмосферного повітря. Проаналізуйте застосування нанофільтрів, сорбентів, каталізаторів і фотокаталітичних покриттів для видалення пилу, газів та летких органічних сполук.
22. Порівняйте традиційні системи очищення повітря з наноструктурованими фільтраційними матеріалами. Оцініть ефективність, аеродинамічний опір, довговічність, енергоспоживання та ризик вторинного вивільнення наночастинок.
23. Проаналізуйте принципи застосування наночастинок нульвалентного заліза у ремедіації забруднених ґрунтів і підземних вод. Поясніть механізми відновлення, сорбції та іммобілізації забруднювачів.
24. Порівняйте технології наноремедіації *in situ* та *ex situ*. Оцініть їх ефективність, керованість процесу, вартість, ризики та доцільність застосування для різних типів забруднення.
25. Проаналізуйте можливості застосування наноматеріалів для відновлення ґрунтів, забруднених важкими металами, нафтопродуктами та органічними токсикантами. Обґрунтуйте вибір матеріалу для кожного типу забруднення.
26. Охарактеризуйте вуглецеві наноматеріали як багатофункціональні компоненти природоохоронних технологій. Проаналізуйте їх застосування у сорбції, мембранах, сенсорах, каталізі та ремедіації.
27. Проаналізуйте переваги та екологічні ризики використання графену і його похідних у природоохоронних технологіях. Зверніть увагу на їх мобільність, біодоступність і можливий токсичний вплив.
28. Розкрийте принципи роботи наносенсорів у системах екологічного моніторингу. Поясніть, як наноструктуровані матеріали забезпечують підвищення чутливості, селективності та швидкості визначення забруднювачів.
29. Порівняйте наносенсиори й традиційні лабораторні методи екологічного контролю. Оцініть їх точність, оперативність, вартість, можливість польового використання та інтеграції в автоматизовані системи моніторингу.
30. Проаналізуйте можливості застосування нанобіосенсорів для виявлення токсичних речовин і біологічних забруднювачів. Розкрийте роль біорецепторів, наноматеріалів і систем перетворення сигналу.
31. Охарактеризуйте перспективи використання нанотехнологій у сфері управління відходами. Проаналізуйте можливості сортування, знешкодження, перероблення та використання відходів як вторинної сировини для одержання наноматеріалів.
32. Проаналізуйте потенціал використання промислових, аграрних та будівельних відходів як сировини для синтезу функціональних наноматеріалів. Оцініть екологічні та ресурсні переваги такого підходу.

33. Розкрийте сутність екотоксикології наноматеріалів. Проаналізуйте фактори, що визначають їх токсичність: розмір, форма, поверхневий заряд, розчинність, агрегацію та хімічний склад.
34. Проаналізуйте шляхи надходження наноматеріалів у компоненти довкілля. Охарактеризуйте їх поведінку в атмосферному повітрі, воді, ґрунтах та біологічних системах.
35. Розкрийте механізми трансформації наноматеріалів у довкіллі. Проаналізуйте процеси агрегації, розчинення, окиснення, сорбції на природних частинках і взаємодії з органічною речовиною.
36. Проаналізуйте процеси біоаккумуляції та біомагніфікації наноматеріалів у трофічних ланцюгах. Оцініть можливі наслідки для водних організмів, ґрунтової біоти, рослин і людини.
37. Охарактеризуйте основні підходи до оцінки екологічного ризику наноматеріалів. Поясніть, як поєднуються дані про небезпечні властивості, концентрацію, експозицію та потенційні наслідки.
38. Розкрийте значення оцінки життєвого циклу наноматеріалів і нанопродукції. Проаналізуйте екологічні впливи на етапах одержання сировини, синтезу, використання, регенерації та кінцевого поводження.
39. Проведіть комплексний аналіз екологічних переваг і ризиків нанотехнологій. Обґрунтуйте, за яких умов використання наноматеріалів може бути екологічно доцільнішим за традиційні технології.
40. Охарактеризуйте перспективні напрями розвитку нанотехнологій у захисті навколишнього середовища. Проаналізуйте роль "розумних" наноматеріалів, зеленого синтезу, багатофункціональних нанокомпозитів, інтеграції наносенсорів із цифровим моніторингом, а також можливості застосування нанотехнологій для відновлення техногенно та воєнно забруднених територій.