

References

1. Bianchini, R.; Buskens, R. An adaptive distributed system-level diagnosis algorithm and its implementation. In the 21st International IEEE Symposium on Fault-Tolerant Computing. New York (USA). 1991. pp.222-229.
2. Mashkov, V.; Barabash, O. Self-checking of modular systems under random performance of elementary checks. Engineering Simulation. Vol.12, 1995. pp.433-445.
3. Gostev, V.; Mashkov, V.; Mashkov, O. Self-diagnosis of modular systems in random performance of elementary tests. Cybernetics and Computing Technology (Discrete Control System). No.105. Allerton Press. 1997. pp.104-111.
4. Mashkov, V. Identification of air-borne control computer systems technical state on the basis of cross-testing. Proc. 5th Mini Cong. on Vehicle System Dynamics. Budapest (Hungary). 1996. pp.78-88.
5. Машков О.А., Косенко В.Р., Дурняк Б.В., Тимченко О.В. Особливості створення функціонально-стійкої системи управління динамічним об'єктом моніторингу навколишнього середовища / Збірник наукових праць, Інститут проблем моделювання в енергетиці, вип. 62, Київ, 2012, с. 210-228.
6. Машков О.А., Косенко В.Р., Дурняк Б.В., Тимченко О.В. Науково-теоретичні основи забезпечення функціональної стійкості системи моніторингу навколишнього середовища / Збірник наукових праць, Інститут проблем моделювання в енергетиці, вип. 63, Київ, 2012, с. 202-218.
7. Машков О.А., Коробчинський М.В., Щукін А.Н., Ярема О.Р. Исследование свойств функционально-устойчивого комплекса управления групповым полетом БПЛА экологического мониторинга / Моделирование та інформаційні технології / Збірник наукових праць, Інститут проблем моделювання в енергетиці, вип. 65, Київ, 2012, с. 202-214.
8. Машков О.А. Коробчинський М.В., Щукін А.Н., Ярема О.Р. Теоретические основы создания функционально-устойчивого комплекса управления групповым полетом беспилотных летательных аппаратов экологического мониторинга / Моделирование та інформаційні технології / Збірник наукових праць, Інститут проблем моделювання в енергетиці, вип. 66, Київ, 2012, с. 215-223.
9. Васильев В.С., Машков О.А., Фролов В.Ф. Методы и технические средства экологического мониторинга / Екологічні науки: науково-практичний журнал. – К.: ДЕА, 2014.-№5.-с. 57-67.

УДК 544.72+544.147

АДСОРБЦІЯ НА ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБКАХ: ОГЛЯД

Іваненко І. М.

кандидат хімічних наук, доцент кафедри технології неорганічних речовин та загальної хімічної технології, хіміко-технологічний факультет, Національний технічний університет України «КПІ»
4 корпус, проспект Перемоги 37, м. Київ, 03056
irinaivanenko@hotmail.com

Розглянута проблематика використання вуглецевих нанотрубок в адсорбційних процесах очищення води і водних розчинів. Наведена коротка характеристика структури одношарових та багатшарових вуглецевих нанотрубок. Проаналізований взаємозв'язок між внутрішньою будовою, хімією поверхні та адсорбційними властивостями вуглецевих нанотрубок. З'ясовано механізми адсорбції на поверхні вуглецевих нанотрубок на молекулярному рівні. Представлені експериментальні докази ефективності нанотрубок в процесах адсорбційного видалення з водних розчинів широкого асортименту органічних, неорганічних та біологічних забруднювачів. **Ключові слова:** вуглецеві нанотрубки, адсорбційна активність, гідрофобна взаємодія, функціональні групи, електронно-донорна взаємодія.

Адсорбция на углеродных нанотрубках. Иваненко Ирина Николаевна. Рассмотрена проблематика использования углеродных нанотрубок в адсорбционных процессах очистки воды и водных растворов. Приведена краткая характеристика структуры однослойных и многослойных углеродных нанотрубок. Проанализирована взаимосвязь между внутренним строением, химией поверхности и адсорбционными свойствами углеродных нанотрубок. Выявлены механизмы адсорбции на поверхности углеродных нанотрубок на молекулярном уровне. Представлены экспериментальные доказательства эффективности нанотрубок в процессах адсорбционного удаления из водных растворов широкого ассортимента органических, неорганических и биологических загрязнителей. **Ключевые слова:** углеродные нанотрубки, адсорбционная активность, гидрофобное взаимодействие, функциональные группы, электронно-донорными взаимодействие.

Adsorption on carbon nanotubes. Ivanenko Irina. The problems of carbon nanotubes using in the adsorption process of cleaning water and aqueous solutions considered. The brief description of single-walled and multi-walled carbon nanotubes structures shown. The relationship between the internal structure, surface chemistry and adsorption properties of carbon analyzed. The adsorption mechanism on the surface of carbon nanotubes elucidated at the molecular level. Experimental evidence for the nanotubes effectiveness in the process of adsorption removal from aqueous solutions of a wide range of organic, inorganic and biological contaminants provided. **Keywords:** carbon nanotubes, adsorption activity, hydrophobic interaction, functional groups, electron-donor interaction.

Вступ

Адсорбційні процеси достатньо давно і широко застосовуються при

підготовці питної води, води спеціального призначення, для очищення стічних вод від різноманітних забруднювачів як органічного так і

неорганічного походження тощо. Активоване вугілля, що за своєю хімічною природою є алотропною модифікацією Карбону, вже давно і активно використовується як промисловий адсорбент. Це зумовлено кількома факторами: високою адсорбційною активністю до широкого спектру полутантів, хімічною інертністю, високою термічною стабільністю, задовільною механічною стійкістю, здатністю до багаторазової регенерації тощо.

Однак з відкриттям Іджімою в 1991 р. вуглецевих нанотрубок (ВНТ) [1] не тільки поповнилась велика сім'я Карбону, а і з'явився новий адсорбційний матеріал з унікальним набором фізико-хімічних властивостей. Крім того, що цей матеріал має розвинену питому площу поверхні, він, як було експериментально доведено згодом, володіє практично усім набором характеристик активного вугілля.

Вуглецеві нанотрубки – протяжні циліндричні структури діаметром від одного до кількох десятків нанометрів і довжиною до кількох

мікрометрів, що складаються з одного або більше гексагональних згорнутих графітових шарів, і закінчуються зазвичай напівсферичною голівкою, яка може розглядатися як половина молекули фулерену. Вперше нанотрубки були знайдені в сажі, яка утворилась в умовах дугового розряду між графітовими електродами, і спочатку розглядалися як протяжні фулерени [2]. Однак подальші дослідження показали, що клас вуглецевих нанотрубок за різноманітністю структур і фізико-хімічних характеристик значно перевищує клас фулеренів (Рис. 1). Тим більше, що фулерени представляють собою молекулярну форму, а нанотрубки суміщають властивості молекул і твердого тіла, а тому розглядаються як проміжний стан речовини (між молекулярним і конденсованим). Ця особливість привертає до себе постійно зростаючий інтерес дослідників, що направлений на вивчення фундаментальних особливостей поведінки такого екзотичного об'єкту в різних умовах.

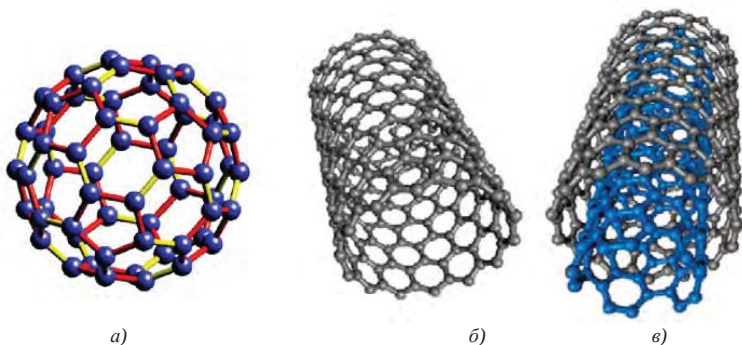


Рис. 1. Фулерен (а), одношарова (б) і багатшарова вуглецеві нанотрубки (в) [3,4]

Багатшарові вуглецеві нанотрубки (БшВНТ) відрізняються від одношарових (ОшВНТ) значно більш широким різноманіттям форм і конфігурацій. Різноманіття структур проявляється як в повздовжньому напрямі так і в поперековому. Можливі різновиди поперекової будови багатшарових вуглецевих нанотрубок представлені на Рис. 2. Будова типу «русской матрёшки» (рис. 2-а) представляє собою коаксіально вкладені одна в одну одностінні циліндричні нанотрубки, внутрішній простір яких, як видно на рисунку, недоступний для проникнення газоподібних або рідких речовин. Інший різновид будови БшВНТ, показаний на рис. 2-б, представляє со-

бою єдину графітову площину, що завернута в свиток. В цьому випадку внутрішній простір нанотрубки стає доступним для проникнення рідких і газоподібних молекул. Остання з приведених модифікацій являє собою багатшарову циліндричну структуру, що складається з невеликих графітових фрагментів і нагадує пап'є-маше. Така структура володіє значним внутрішнім об'ємом, що доступний для проникнення різноманітних речовин, і представляється вельми привабливою з точки зору фізичної адсорбції. Для всіх наведених структур ВНТ характерна відстань між сусідніми графітовими шарами, близька до значення 0,34 нм, як в графіті [2].

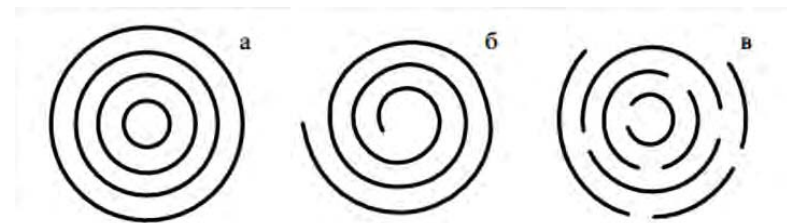


Рис. 2. Схематичне зображення найбільш розповсюджених структур багатшарових вуглецевих нанотрубок: а – «русская матрёшка»; б – свиток; в – пап'є-маше [2]

вуглецеві нанотрубки, являючись полою шаруватою структурою 1D-типу з регульованою хімією поверхні, представляють собою багатобічне третє покоління вуглецевих адсорбентів. Всі адсорбційні центри ВНТ розташовані на внутрішній та зовнішній поверхні карбонових шарів, тому одна з головних особливостей вуглецевих нанотрубок – їх унікальні адсорбційні характеристики. Крім того, ВНТ являють собою поверхневі структури, і

вся їх маса зосереджена в поверхні шарів, що зумовлює аномально високу питому площу поверхні для перебігу адсорбційних процесів.

В науковій літературі вже неодноразово доводилась виключна адсорбційна здатність ВНТ та висока ефективність при адсорбції різних органічних полутантів, таких як диоксин, дібензофуран і дифеніл [5], 1,2-дихлорбензол [6], анілін, фенол [7], гумінові та фульвокислоти [8], інші природні органічні речовини [9],

поліциклічні ароматичні вуглеводороди тощо [10]. Все це доводить безперечну перспективність застосування ВНТ в процесах адсорбційної очистки стічних від органічних забруднювачів.

Широкий спектр органічних речовин та важких металів вивчався як цільові полютанти на ВНТ з різноманітною фізичною структурою та хімією попер

хні. Досліджувався також вплив природи розчинів, включаючи рН та іонну силу. На основі цих даних були з'ясовані механізми адсорбції на молекулярному рівні. Для більшості досліджених випадків адсорбції експериментально доведено можливість існування кількох сил одночасно, а саме: гідрофобного ефекту, π - π взаємодії, електронної донорно-акцепторної взаємодії, електростатичної та водневого зв'язку.

Встановлено, що гідрофобна природа зовнішньої поверхні необроблених ВНТ має високу спорідненість до органічних речовин, особливо з неполярними молекулами, таких як нафтален, фенатрен, пірен тощо [9,10]. Саме гідрофобна взаємодія була висунута для пояснення механізму в кількох роботах і підтвердилась для протеїнів [11,12], нафталена [13], кислих гербіцидів [14] та стрептавідіна [12]. Але, як щоб гідрофобна взаємодія була єдиним механізмом взаємодії органіки з ВНТ, адсорбція була прогнозованою і могла б регулюватись гідрофобними параметрами органічних речовин, такими як K_{ov} (коефіцієнт розподілу між октаном і водою) або K_{ze} (коефіцієнт розподілу між гексадеканом і водою). В цьому

випадку поведінка органічних полютантів в присутності ВНТ була б достатньо легко контрольованою, але для більшості випадків це не так. Автори роботи [15] представили експериментальні дані, що спростовують кореляцію між адсорбційною спорідненістю та гідрофобністю для ряду ароматичних речовин. Вони досліджували адсорбцію кількох полярних та неполярних полютантів на нанотрубках і встановили, що гідрофобний ефект не є домінуючим з загальному механізмі взаємодії. Наприклад, циклогексан має більш високе значення K_{ov} у порівнянні з нітробензолом, однак адсорбція циклогексана на ВНТ слабкіша більше ніж на два порядки; а у порівнянні з бензолом, толуолом і хлорбензолом адсорбція нітробензолу на ВНТ сильніша, незважаючи на нижчу гідрофобність. З цієї причини автори прийшли до висновку, що π - π електронно-донорна взаємодія між нітроароматичною молекулою (π -акцептором) і графеновими шарами нанотрубок (π -донор) в ряді випадків домінує в загальному адсорбційному механізмі. В межах нітроароматичних сполук, таким чином, адсорбційна спорідненість зростає з підвищенням числа нітрогруп [15]. Тобто велика кількість π -електронів на поверхні нанотрубок (Рис. 3) передбачає виникнення сильного π - π зв'язку з ароматичними полютантами.

Враховуючи вищеописані механізми, морфологія ВНТ, включаючи неоднорідність їх нанорозмірів та хіральність графенових шарів, будуть мати великий вплив на адсорбцію органічних полютантів, особливо тих, що адсор-

буються внаслідок π - π взаємодії. Це було експериментально доведено авторами роботи [17], в якій

зафіксована суттєва відмінність між адсорбцією тетрацена і фенантрена на поверхні нанотрубок.

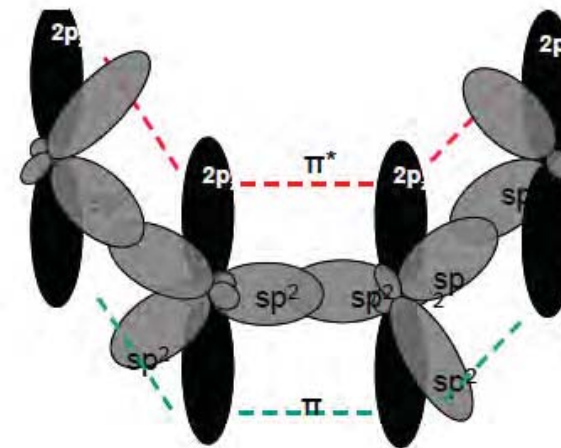


Рис. 3. Фрагмент електронної будови ВНТ [16]

Відмінності в морфології ВНТ можуть також призвести до різного характеру агрегування і додаткового впливу на їх адсорбційну ємність. ВНТ схильні до агрегації завдяки сильним силам Ван дер Ваальса вздовж довгої вісі, причому тенденція до агрегування зменшується із збільшенням кількості стінок (шарів). В цілому, схильність до агрегування ВНТ збільшується в такому порядку: одношарові ВНТ > двошарові ВНТ > багатошарові ВНТ [18].

Одношарові ВНТ зазвичай існують як пучки або мотузки, в той час як багатошарові виглядають як випадково згорнуті індивідуальні трубки. Внаслідок агрегації зовнішня поверхня нанотрубок зменшується, але з'являються нові адсорбційні

центри – інтерстіціальні канали та канавки між окремими трубками в пучках ВНТ.

В роботі [19] виведено рівняння розрахунку зміни об'єму пор та питомої площі поверхні внаслідок агрегації та встановлено, що агрегація ВНТ не сприяє адсорбції деяких синтетичних органічних речовин. Дією ультразвуку на суспензію нанотрубок доведено залежність кінетики адсорбції органічних речовин від «статусу суспензії» – ступеня агрегування ВНТ [20].

Іншим важливим фактором впливу на адсорбційну поведінку ВНТ є хімія їх поверхні, що представлена функціональними групами, які цілеспрямовано вводяться на поверхню ВНТ шляхом обробки

рідкими або газоподібними окисниками. Це можуть бути звичайні карбоксильні групи (Рис. 4-а) або гідроксильні, які на краю графітової площини мають фенольний характер (Рис. 4-б). Атом Оксигену може кріпитися до крайових атомів Карбону у вигляді ксантової структури (Рис. 4-с) або ефірної групи (Рис. 4-д). Розташовані поряд карбоксильні групи можуть утворювати ангідридні угруповування (Рис. 4-е). Також

карбоксильні групи можуть конденсуватися у вигляді лактонових груп (Рис. 4-ф), які, в свою чергу, можуть утворювати лактоли (Рис. 4-г) при близькому розташуванні ще однієї карбоксильної або гідроксильної групи. Атом Оксигену карбонільної групи може кріпитися до поверхні індивідуально (ізолювано), як на Рис. 4-с, або організовувати хінонову структуру (Рис. 4-г) [21].

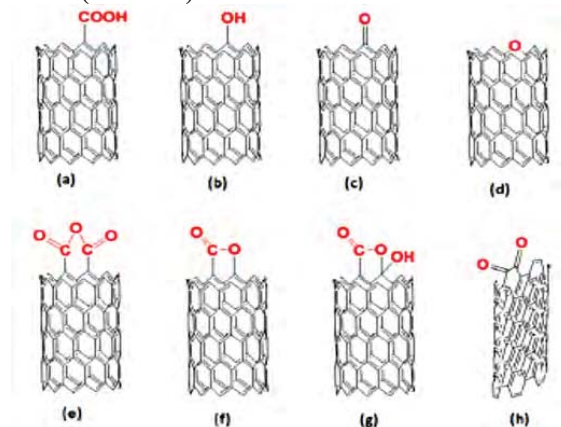


Рис. 4. Імовірні функціональні групи на поверхні ВНТ: а – карбоксильна; б – гідроксильна; с – карбонільна; д – ефірна; е – ангідридна; ф – лактонова; г – лактольна; h – хінонова [21].

Такі поверхневі функціональні групи позитивно впливають на гідрофільність та адсорбційну активність ВНТ по відношенню до органічних забруднючів, особливо з полярними молекулами та низькою молекулярною масою, таких як фенол, діхлорбензол тощо.

Як показано в [22], адсорбція важких металів на ВНТ відбувається головним чином завдяки утворенню специфічних комплексів між іонами металів і гідрофільними

функціональними групами нанотрубок. Таким чином, функціоналізація поверхні ВНТ є фактором, що безсумнівно буде сприяти підвищенню поглинання іонів металів поверхнею нанотрубок.

Автори [23] повідомляли, що окиснення поверхні вуглецевих нанотрубок сприяє підвищенню адсорбції іонів кадмію і цинку з водних розчинів, і виявили, що карбоксильні групи на поверхні ВНТ є в 20 разів більш енергійними

адсорбційними центрами для поглинання $Zn(II)$, ніж неокислена поверхня нанотрубок. В [24] показано, що $-OH$ і $-COOH$ групи на поверхні ВНТ слугують адсорбційними центрами при адсорбційному поглинанні іонів міді(II), оскільки поверхнево функціоналізовані ВНТ мали вищу адсорбційну ємність по міді, ніж вихідні ВНТ. Адсорбція Cd^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} на вуглецевих нанотру-

рубках, вихідних і оброблених різними окисниками (нітратною кислотою, гіпохлоритом натрію та перманганатом калію), вивчалась в роботі [25]. Її автори прийшли до висновку, що адсорбційна ємність ВНТ по відношенню до іонів дво-валентних металів значно підвищується після їх окиснення і запропонували схему, яка описує цей процес (Рис. 5).

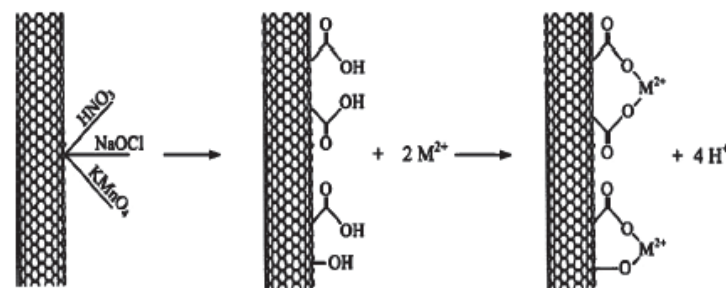


Рис. 5. Схематичне зображення адсорбції дво-валентного металу окисненою поверхнею ВНТ [25]

Адсорбція бактерій на ВНТ характеризується трьома основними факторами. По-перше, адсорбційна ємність ВНТ по відношенню до мікробів значно перевищує ємність всіх відомих на сьогоднішній день комерційних адсорбентів. По-друге, ВНТ володіють яскраво вираженою селективністю щодо бактерій, яка зазвичай відсутня у традиційних адсорбентів. І нарешті, кінетика адсорбції: поглинання бактерій нанотрубками відбувається практично миттєво, що відкриває широкі перспективи їх застосування як патогенних датчиків, для яких швидкість концентрування цільового компонента суміші є визначальним фактором [26].

Адсорбційна здатність необроблених ОшВНТ до Сінної палички та її спор у 27-37 разів більше, ніж порошкоподібного активованого вугілля та промислового адсорбенту NanoCeram™, що повідомлено в [27].

В [28] високий, порівняно з іншими адсорбентами, потенціал адсорбції ОшВНТ відносно бактерій пояснювали їх волокнистою: початкове співвідношення сторін в індивідуальній нанотрубі становить ~2000, чого не спостерігається в активному вугіллі. Такі висновки узгоджуються з даними роботи [27], в якій на прикладі спор Сінної палички показано, що бактерії погано адсорбуються на таких адсорбентах як активоване вугілля (Рис. 6-б) та

NanoCeram™ (Рис. 6-с), і виглядають ніби покладеними на їх поверхню. З іншого боку, спори на нанотрубках демонструють відмінний адсорбційний потенціал, і виглядають ніби загорнутими у волокна ВНТ (Рис. 6-d).

Автори роботи [29], доречи, ще в 1991 заявляли, що волокнисті адсорбенти мають кращі показники щодо адсорбції мікробів, ніж порошкоподібні.

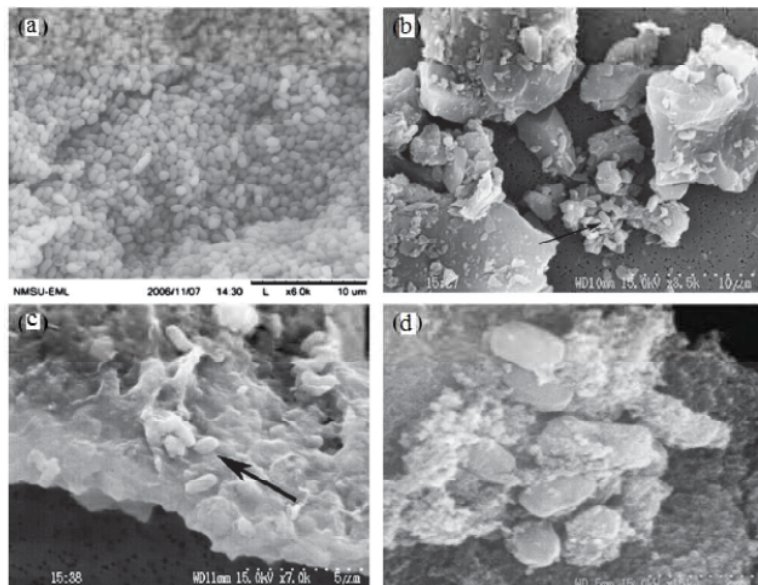


Рис. 6. СЕМ-зображення спор Сінної палички вихідних (а) і адсорбованих на: активованому вугіллі (b); адсорбенті NanoCeram™ (c); ОшВНТ (d) [27]

Висновки

Таким чином, вуглецеві нанотрубки чудово зарекомендували себе в адсорбційних процесах видалення з водних розчинів широкого асортименту різноманітних забруднювачів не тільки органічних і неорганічних, а й біологічних, включаючи бактерії, віруси, токсини ціанобактерій тощо. А можливість модифікування поверхні та інші маніпуляції з ВНТ дозволяють повністю скористатися їх

унікальними фізичними, хімічними та іншими властивостями.

Функціональні матеріали на основі ВНТ будуть мати безперечні переваги в порівнянні з відомими матеріалами в різних екологічних застосуваннях. Однак інтеграція ВНТ в традиційних процесах підготовки та очищення води потребує розробки високопродуктивної та економічно ефективної технології їх виробництва.

Література

1. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon / S. Iijima // Nature. – 1991. – Vol. 354. – P. 56-58.
2. Елецкий А.В. Сорбционные свойства углеродных наноструктур / А.В. Елецкий // Успехи физ. наук. – 2004. – Т. 174, № 11. – С. 1191-1231.
3. Ulloa E. Fullerenes and their Applications in Science and Technology / E. Ulloa // Introduct. Nanotech. – 2013. – Vol. 5425. – P. 1-5.
4. Sedaghat S. Synthesis of clay-CNTs nanocomposites / S. Sedaghat // J. Nanostr. Chem. – 2013. – Vol. 3, №24. – P.1-4.
5. Fugestsu B. Encapsulatin of multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs) in Ba²⁺-alginate to form coated micro-beads and their applicatins to the pre-concentratin / eliminatin of dibenzo-p-dioxin, dibenzofuran, and biphenyl from contaminated water / B. Fugestsu, S. Satoh, A. Iles [etc.] // Analyst. – 2004. – Vol. 129. – P. 565-566.
6. Peng X. Adsorptin of 1,2-dichlorobenzene from water to carbon nanotubes / X. Peng, Y. Li, Z. Luan [etc.] // Chem. Phys. Lett. – 2003. – 376. – P. 154-158.
7. Yang K. Aqueous adsorptin of aniline, phenol, and their substitutes by multiwalled carbon nanotubes / K. Yang, W. Wu, Q. Jing [etc.] // Environ. Sci. Technol. – 2008. – Vol. 42. – P.7931-7936.
8. Sheng G. Adsorptin of copper(II) on multialled carbon nanotubes in the absense and presence of humic or fulvic acids / G. Sheng, J. Li, D. Shao [etc.] // J. Hazard. Mater. – 2010. – Vol. 178. – P. 333-340.
9. Hyung H. Natural organic matter (NOM) adsorption to multi-walled carbon nanotubes: effect of nom characteristics and water quality parameters / H. Hyung, J.H. Kim // Environ. Sci. Technol. – 2008. – Vol. 42. – P. 4416-4421.
10. Іваненко І.М. Вуглецеві нанотрубки в очищенні води (огляд) / І.М. Іваненко // Вода и водоочистные технологии. Научно-технические вести. – 2014. – № 2(15). – С. 65-71.
11. Balavoine F. Helical crystallization of proteins on carbon nanotubes: A first step towards the development of new biosensors / F. Balavoine, P. Schultz, C. Richard [etc.] // Angew. Chem., Int. Ed. – 1999. – Vol. 38. – P. 1912-1915.
12. Chen R. J. Noncovalent functionalization of carbon nanotubes for highly specific electronic biosensors / R.J. Chen, S. Bangsaruntip, K.A. Drouvalakis [etc.] // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. – 2003. – Vol. 100. – P. 4984-4989.
13. Gotovac S. Assembly structure control of single wall carbon nanotubes with liquid phase naphthalene adsorption / S. Gotovac, L. Song, H. Kanoh [etc.] // Colloid Surf., A. – 2007. – Vol. 300. – P. 117-121.
14. Pyrzynska, K. Sorption behavior of acidic herbicides on carbon nanotubes / K. Pyrzynska, A. Stafiej, M. Biesaga // Microchim. Acta. – 2007. – Vol.159. – P. 293-298.
15. Chen W. Adsorption of polar and nonpolar organic chemicals to carbon nanotubes / W. Chen, L. Duan, D. Q. Zhu // Environ. Sci. Technol. – 2007. – Vol. 41. – P. 8295-8300.
16. Vermisoglou E. C. Sorption properties of modified single-walled carbon nanotubes / E.C. Vermisoglou, V. Georgakila, E. Kouvelos [etc.] // Micropor. Mesopor. Mater. – 2007. – Vol. 99. – P. 98-105.
17. Gotovac S. Effect of nanoscale curvature of single-walled carbon nanotubes on adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons / S. Gotovac, H. Honda, Y. Hattori [etc.] // Nano Lett. – 2007. – Vol. 7, №3. – P. 583-587.
18. Liu X. Application potential of carbon nanotubes in water treatment: A review / X. Liu, M. Wang, S. Zhang [etc.] // J. Environ. Sci. – 2013. – Vol. 25, №7. – P. 1263-1280.
19. Zhang S. J. The impacts of aggregation and surface chemistry of carbon nanotubes on the adsorption of synthetic organic compounds / S.J. Zhang, T. Shao, S. S. K. Bekaroglu [etc.] // Env. Sci. Technol. – 2009. – Vol. 43, №15. – P. – 5719-5725.

20. Zhang S.J. Adsorption kinetics of aromatic compounds on carbon nanotubes and activated carbons / S.J. Zhang, T. Shao, H.S. Kose [et al.] // *Env. Toxic. Chem.* – 2012. – Vol. 31, №1. – P. 79-85.
21. Gupta V.K. Synthesis of Carbon Nanotube-Metal Oxides Composites; Adsorption and Photodegradation / V.K. Gupta, T.A. Saleh // *Carbon Nanotubes - From Research to Applications*, Dr. Stefano Bianco (Ed.): InTech, 2011. – P. 295-312. – 358 p. ISBN 978-953-307-500-6.
22. Rao G.P. Sorption of divalent metal ions from aqueous solution by carbon nanotubes: A review / G.P. Rao, C. Lu, F.S. Su // *Separ. Purific. Technol.* – 2007. – Vol. 58, №1. – P. 224-231.
23. Cho H.H. Sorption of aqueous Zn[II] and Cd[II] by multiwall carbon nanotubes: The relative roles of oxygen-containing functional groups and graphenic carbon / H.H. Cho, K. Wepasnick, B.A. Smith [et al.] // *Langmuir*. – 2010. – Vol. 26, №2. – 967-981.
24. Rosenzweig S. Effect of acid and alcohol network forces within functionalized multiwall carbon nanotubes bundles on adsorption of copper(II) species / S. Rosenzweig, G.A. Sorial, E. Sahle-Demessie [et al.] // *Chemosphere*. – 2013. – Vol. 90, №2. – P. 395-402.
25. Srivastava S. Sorption of divalent metal ions from aqueous solution by oxidized carbon nanotubes and nanocages: A review / S. Srivastava // *Adv. Mat. Lett.* – 2013. – Vol. 4, №1. – P. 2-8.
26. Upadhyayula V.K.K. Application of carbon nanotube technology for removal of contaminants in drinking water: A review / V.K.K. Upadhyayula, Sh. Deng, M.C. Mitchell [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 2009. – Vol. 408. – P. 1-13.
27. Upadhyayula V.K.K. Adsorption of *Bacillus subtilis* on single walled carbon nanotube aggregates, activated carbon and nanoceramTM / V.K.K. Upadhyayula, S. Deng, G.B. Smith [et al.] // *Water Res.* – 2009. – Vol. 43, №. P.1-9.
28. Ounaies Z. Electrical properties of single walled carbon nanotube reinforced polyimide composites / Z. Ounaies, C. Park, K.E. Wise [et al.] // *Compos. Sci. Technol.* – 2003. – Vol. 63. – P. 1637-1647.
29. Suzuki M. Applications of fiber adsorbents in water treatment / M. Suzuki // *Wat. Sci. Technol.* – 1991. – Vol. 23. – P. 1649-1658.

ЕКОЛОГІЯ І ВИРОБНИЦТВО

УДК 621.039.58:502/504

ОЦІНКА РИЗИКІВ РАДІОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ФУКУСІМСЬКОЇ КАТАСТРОФИ

Козлов І.І.

Одеський національний політехнічний університет
пр. Шевченка, 1, 65044, м.Одеса
i.i.kozlov@yandex.ua

Обґрунтовано необхідність після аварії на АЕС Fukushima, - Daiichi повернутися до необхідності переоцінки ризиків потенційно важких і довгострокових радіологічних наслідків масштабних катастрофічних подій. Представлено результати аналізу дій японської сторони і міжнародних організацій щодо пом'якшення і ліквідації наслідків цієї. Узагальнено оцінки радіаційних ризиків захворюваності серед ліквідаторів і населення на підставі моделей прогнозування міжнародною комісією з радіаційного захисту (МКРЗ) оцінки радіаційних ризиків з урахуванням даних по Чорнобильській АЕС. Спрогнозовано оцінки можливих віддалених радіологічних наслідків аварії на АЕС Fukushima - Daiichi. Одержані оцінки носять попередній характер і передбачають проведення подальшого моніторингу і аналізу розв'язання питань екологічної безпеки і усунення наслідків будь-яких аварій на АЕС. **Ключові слова:** аварія на АЕС Fukushima - Daiichi; Чорнобильська аварія, оцінка радіаційних ризиків, прогноз радіологічних наслідків.

Оценка рисков радиологических последствий Фукусимской катастрофы. Козлов И.И. Обоснована необходимость после аварии на АЭС Fukushima, - Daiichi вернуться к необходимости переоценки рисков потенциально тяжелых и долгосрочных радиологических последствий масштабных катастрофических событий. Представлены результаты анализа действий японской стороны и международных организаций по смягчению и ликвидации последствий этой. Обзор оценки радиационных рисков заболеваемости среди ликвидаторов и населения на основании моделей прогнозирования международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ) оценки радиационных рисков с учетом данных по Чернобыльской АЭС. Спрогнозировано оценки возможных отдаленных радиологических последствий аварии на АЭС Fukushima - Daiichi. Полученные оценки носят предварительный характер и предусматривают проведение дальнейшего мониторинга и анализа решения вопросов экологической безопасности и устранения последствий любых аварий на АЭС. **Ключевые слова:** авария на АЭС Fukushima-Daiichi; Чернобыльская авария, оценка радиационных рисков, прогноз радиологических последствий.

Assessment of risks of radiological consequences of the Fukushima accident. Kozlov I. The necessity of following the accident at the nuclear power plant Fukushima, - Daiichi need to return to the reevaluation of risk of potentially severe and long-term radiological consequences of major catastrophic events. The results of analysis of actions of the Japanese side and international