

АДСОРБЦІЯ ТА ДЕСОРБЦІЯ ВОДНЮ НА ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБКАХ

Валерія Глушук

магістрант кафедри екології та технології рослинних полімерів

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, gvtmars@gmail.com

Олександр Снігур

науковий співробітник відділу термохімічних процесів та нанотехнологій

Інститут газу Національної академії наук України, вул. Дегтярівська, 39, Київ, Україна, 03113,
snigurec@gmail.com

Олена Іваненко

доктор технічних наук, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, olenka.vasaynovich@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6838-5400

Вікторія Ковбасюк

аспірант кафедри екології та технології рослинних полімерів

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, victoriakpi@ukr.net

Юрій Марчук

старший науковий співробітник відділу термохімічних процесів і нанотехнологій

Інститут газу Національної академії наук України, вул. Дегтярівська, 39, Київ, Україна, 03113,
marchukYV@nas.gov.ua

Олексій Сезоненко

науковий співробітник відділу проблем промислової теплотехніки

Інститут газу Національної академії наук України, вул. Дегтярівська, 39, Київ, Україна, 03113, alsez@ukr.net

Вуглецеві наноматеріали, зокрема вуглецеві нанотрубки, виявляються перспективними сорбентами для водню, сприяючи розвитку водневої енергетики. Окрім того, використання відходів різноманітних виробництв може стати важливим джерелом вуглецевих матеріалів для виробництва вуглецевих нанотрубок.

Дослідження у сфері адсорбції водню на вуглецевих матеріалах має велике значення для розвитку чистої енергії (REPowerEU) та пришвидшить перехід до «зеленої» енергетики. Водень є ефективним джерелом енергії і може використовуватися для зменшення залежності від вуглецевих палив та обмеження викидів парникових газів.

Використання вуглецевих нанотрубок як сорбентів для водню вказує на можливість подальшого розвитку водневої енергетики та створення більш стійких та продуктивних систем для зберігання та використання водню.

Результати дослідження також вказують на важливість пошуку і розвитку нових джерел вуглецевих матеріалів, які можуть бути використані для виробництва вуглецевих нанотрубок та інших наноматеріалів. Це відкриває нові можливості для використання відходів промисловості та біосировини для створення ефективних матеріалів для водневої енергетики та інших важливих застосувань.

Це дослідження відкриває перспективи для використання відходів різних галузей промисловості як джерела вуглецевих матеріалів для виробництва вуглецевих нанотрубок і підкреслює важливість розвитку водневої енергетики як сталого джерела енергії.

Окрім того, розглянуто можливість проходження процесів адсорбції-десорбції водню на отриманих зразках наноматеріалів. Експериментально визначено водневу ємність трьох груп адсорбентів: (а) нанотрубки з природного газу; (б) з пропан-бутану; (в) наносорбенти з біосировини з високою розвинутою питомою поверхнею.

Найвища питома ємність становила 14,8 см³(H₂)/г у перерахунку на нормальні умови для зразку ВНТ, отриманого з продуктів повітряної конверсії природного газу з найбільшим умістом водню. Ці результати підкреслюють

потенціал вуглецевих нанотрубок як ефективних сорбентів для водню та важливість подальшого дослідження у цьому напрямі для розвитку водневої енергетики та створення стійких енергетичних систем.

Ключові слова: ВНТ, вуглецеві нанотрубки, зберігання водню, сорбція, наноматеріали, сорбенти водню, адсорбційна ємність.

Актуальність роботи. Через стрімке зростання світового населення (очікується, що до 2050 р. воно досягне 9,7 млрд) і швидке споживання людиною матеріальних ресурсів попит на енергію постійно зростатиме. Окрім того, з кожним роком спостерігається зростаюча кількість відходів, оскільки сучасне суспільство продовжує розвиватися та широко споживати ресурси. Зараз традиційні невідновлювані види викопного палива: нафта, вугілля та природний газ забезпечують понад 80% світової енергії [1; 2].

Водень вважається екологічно чистим, поширеним, ефективним і недорогим джерелом енергії для різноманітних застосувань, включаючи стаціонарне електропостачання, розподіл і різноманітні мобільні платформи, що працюють на водневому паливі. Завдяки найвищій гравіметричній щільності енергії (120 МДж/кг), нульовим викидам парникових газів і воді як єдиному вихлопному продукту під час перетворення на енергію водень є ідеальним довгостроковим рішенням екологічних проблем, пов'язаних з енергетикою [3].

Однак для досягнення сталого розвитку водневої енергетики необхідно подолати життєво важливі технологічні та економічні виклики. Перш за все, серед цих перешкод є відсутність відповідних підходів до зберігання водню. Незважаючи на найбільшу гравіметричну щільність енергії, водень має низьку об'ємну щільність енергії (0,01 МДж/л для водню проти 32 МДж/л для бензину при 0°C і 1 атм), що перешкоджає його масштабному зберіганню у м'яких умовах [4].

Літературний огляд опублікованих статей і монографій указує, що найбільш перспективними об'єктами для зберігання водню є вуглецеві наноматеріали, зокрема вуглецеві нанотрубки (ВНТ). Отримання та вивчення адсорбції водню на вуглецевих сорбентах відкриває широкі можливості та ставить перед науковцями практичні завдання [1]. Вуглецеві нанотрубки мають велику поверхню та високу пористість, що робить їх відмінними сорбентами для водню. Ця велика поверхня сприяє ефективній адсорбції молекул водню, що є ключовим параметром для ефективного зберігання водню. Адсорбція водню на вуглецевих сорбентах має великий потенціал для

застосування у водневій енергетиці та «зеленому транспорті».

Відомо, що під час нагрівання газової фази, яка містить CO, відбувається утворення твердого вуглецевого матеріалу внаслідок процесу диспропорціонування (розкладання) монооксиду вуглецю у результаті реакції:



Альтернативним видом сировини для отримання ВНТ можуть слугувати тверді побутові відходи, оскільки вони мають низьку перевагу. Газифікація таких ТПВ, як шкаралупи соняшникового насіння, деревні пелети, рис, пташиний послід, дає такий склад генераторного газу: CO – 12–30%, H₂ – 10–25%, CH₄ – 0,05–5%. Склад баласту: N₂ – 35–55%, CO₂ – 8–15%, H₂O – 2–20%. Газифікація таких палив має низьку позитивних якостей: по-перше, усі органічні сполуки розщеплюються та газифікуються всередині апарату; по-друге, газ не містить смолистих речовин. До недоліків біопалива з відходів можна віднести складну підготовку: роздільне збирання, сортування, подрібнення, виготовлення пелет або брикетів, а також зміну складу та теплотворної здатності генераторного газу за зміни палива [5]. Останнім часом спостерігається істотна дослідницька цікавість до газифікації вугілля та різних сумішей біопалива для вдосконалення процесу зменшення вмісту смол у газовому продукті. Окрім того, присутня у біомасі зола є катализатором газифікації вугілля [6; 7].

Катализаторами реакції утворення вуглецевого наноматеріалу з біопалива є свіжовідновлене залізо, нікель, кобальт і паладій. Як свідчать отримані авторами [1] результати, найкращим катализатором є свіжовідновлене залізо. Із підвищенням температури швидкість хімічної реакції різко зростає, але при $t > 650^\circ\text{C}$ може виникнути дефіцит монооксиду вуглецю, який може брати участь у реакціях вуглецеутворення.

Шляхом піролізу можна також утилізувати широкий спектр пластикових відходів [8; 9], до того ж пропонується використовувати сміття з різних матеріалів, коли роздільний збір сміття не є життєздатною альтернативою [10]. Окрім того, завдяки регулюванню типів реакторів, температур реакції та типів катализаторів процес піролізу

дає змогу отримувати продукт визначеної якості [11–13]. Це дуже вигідно з погляду всього економічного циклу. Тому піроліз є екологічно чистим варіантом порівняно зі спалюванням та неефективним захороненням відходів на полігонах.

Також запропоновано піддавати піролізу відходи пластмас із метою отримання водню, рідкого палива та новітніх матеріалів, таких як вуглецеві нанотрубки [14–16], що нині перебувають на стадії зростання свого життєвого циклу [17]. У роботі [18] визначено характерні параметри піролізу реальних відходів пластмас із подальшим дослідженням виробництва високоцінних ВНТ каталітично-піролітичним методом. Найвищий ступінь чистоти ВНТ (93,04%) було отримано, коли як вихідну сировину використовували попередньо змішаний пластик із деревними пелетами. У цілому результати цієї роботи розширюють і поглиблюють наше розуміння поведінки справжніх відходів пластмас під час піролізу та пропонують стійке рішення світової кризи відходів пластмас, даючи змогу виробляти сучасні вуглецеві матеріали в екологічно чистий спосіб [19–22].

Ще одним джерелом отримання вуглецевих нанотрубок є відходи ПЕТ, у разі використання яких як продукту отримують 39 мас. % вуглецевих нанотрубок із середнім діаметром 20 нм [23].

Отже, **метою дослідження** було визначення можливості використання як адсорбенту водню ВНТ, отриманих із продуктів повітряної конверсії природного газу, пропан-бутану в Інституті газу Національної академії наук України та експериментально розроблених у Національному інституті раку вуглецевих сорбентів з азотовмісної смоли, фенолу, нафтового пеку, лушпиння коксу.

Матеріал і результати досліджень. Для дослідження процесів отримання ВНТ було створено дослідну лабораторну установку, схему якої представлено на рис. 1.

Конверсія природного газу та пропан-бутану проводилася в реакторі каталітичної конверсії 1 із каталізатором ГІАП-3-6Н. Отриманий конвертований газ проходив через вузол очищення і поступав до горизонтальної печі 2, у реакційну зону якої був завантажений каталізатор із нержавіючої сталі X18H10T, Ст3. Водень 5 виконує функцію активатора металевого каталізатора, на якому відбувався ріст ВНТ. Склад пропан-бутанової суміші та отриманого конвертованого газу визначався у газоаналітичній лабораторії Інституту газу НАНУ на газовому хроматографі 6890 N Agilent.

Визначення питомої ємності отриманих за різних умов ВНТ та експериментально розроблених

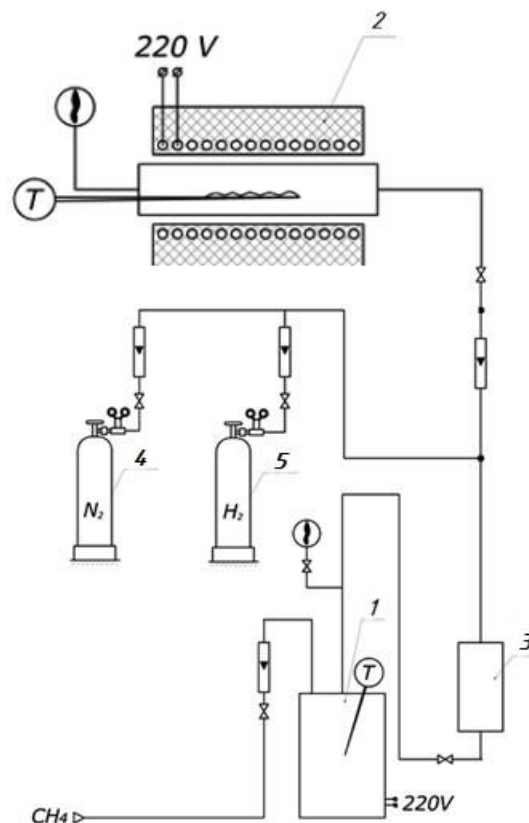


Рис. 1. Технологічна схема лабораторної установки для дослідження процесів одержання ВНТ: 1 – генератор конвертованого газу, 2 – горизонтальна піч, 3 – поглинач вологи, 4 – балон з азотом, 5 – балон із воднем

вуглецевих сорбентів проводилося відповідно системі вимірювань, що схематично показана на рис. 2, де позиції А, Б, В ілюструють положення запірної арматури під час окремих операцій.

Сорбція водню з балона 4 зразком наносорбенту відбувалася у контейнері 5 під контрольованим тиском, десорбція – шляхом скидання тиску та нагрівання контейнеру.

На початку досліду зразок ВНТ та сорбенту зважували, вмішували у контейнер, розраховували об’ємну щільність, систему перевіряли на герметичність при 100 атм (рис. 2, поз. А). Після дворазової продувки скидали тиск до 1 атм, зразок нагрівали до 300°C та витримували протягом 30 хв. для видалення азоту, кисню та інших домішок атмосферного повітря. Надалі контейнер охолоджували, підтримуючи надлишковий тиск близько 1 атм, підвищували тиск до 100 атм та витримували його протягом 14 годин (рис. 2, поз. Б). Після чого визначали об’єм сорбенту об’ємним методом (рис. 2, поз. В) за скидання тиску до 1 атм, надалі контейнер нагрівали до 300°C і витри-

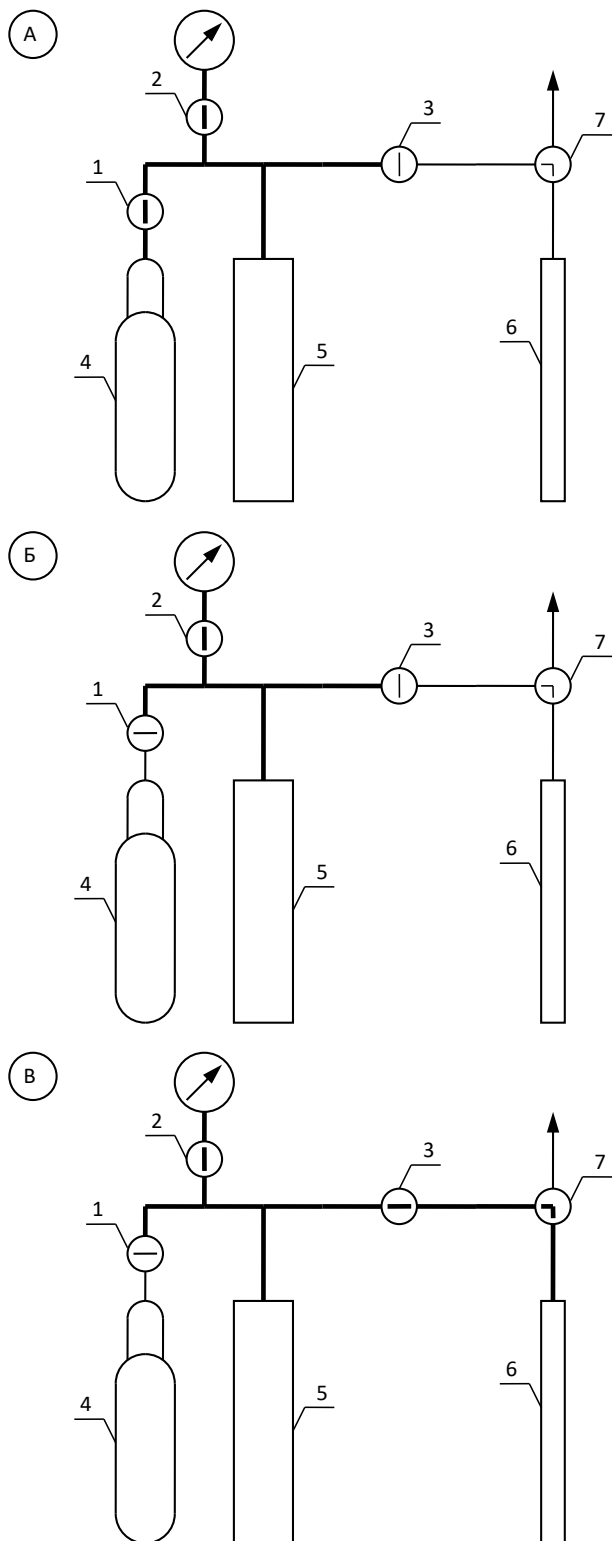


Рис. 2. Послідовність операцій у перебігу експерименту: А – перевірка на герметичність; Б – витримка зразку під тиском до 100 атм; В – вимірювання об'єму водню у системі; 1, 2, 3, 7 – запірні арматури; 4 – балон із H_2 ; 5 – контейнер; 6 – вузол вимірювання об'єму H_2

мували протягом 30–40 хв., вимірювали кількість водню, десорбованого під час нагрівання.

У процесі досліджень було помічено, що за постійної температури десорбції водню (підтримувалася на рівні $300^{\circ}C$) швидкість його виділення уповільнювалася, але загальна кількість водню збільшувалася з часом дослід. На цьому етапі час спостереження за зміною показників процесу десорбції було збільшено до 7–8 годин із проміжною фіксацією об'єму водню, який був виділений за час досягнення температури $300^{\circ}C$ та за перші 1,5–2–3 години, а також у кінці дослід. Результати наведено в табл. 1.

Розгляд наведених даних показує, що кожній групі досліджених адсорбентів властиві різні показники збільшення кількості десорбованого водню порівняно з показником, одержаним за час досягнення температури $300^{\circ}C$.

У першій групі – продукти повітряної конверсії природного газу – збільшення дорівнює від 9,4% (№ 1) та 7,7% (№ 2) до 133% (№ 4), 135% (№ 3) та 190% (№ 5).

У другій групі – продукти повітряної конверсії пропан-бутану – відповідний показник становить від 80% (№ 8) та 100% (№ 7) до 207% (№ 6), що можна пояснити припущенням про наявність кореляції маси та властивостей нанотрубок залежно від величини вуглецевого потенціалу [С] конвертованого газу.

Показники третьої групи відрізняються швидким досягненням результату, близького до остаточного, та, відповідно, низькими показниками приросту десорбованого водню за 2–4–7 годин. Цей факт може пояснюватися тим, що вихід водню із внутрішньої поверхні нанотрубок потребує набагато більше часу, ніж із поверхні активованого вугілля, яка є більш відкритою для контакту з газовою фазою.

Детальніше хід процесу десорбції водню під час нагрівання зразків простежується на графіках на рис. 3.

Уже за досягнення температури $125^{\circ}C$ зразки третьої групи віддають близько 80% H_2 , і тільки залишок 20% продовжує виділятися з набагато повільнішою швидкістю. На відміну від цього нанотрубки 1 та 2 групи за тієї самої температури $125^{\circ}C$ віддають 20–30% H_2 , після чого настає пауза до 230 – $250^{\circ}C$. За нашим припущенням, таке уповільнення пояснюється низькою швидкістю виходу водню із внутрішнього простору трубок. На останньому температурному відрізку відбувається швидка десорбція, яка далі (за межами рисунку) продовжується протягом 6–8 годин.

Показники десорбції водню, одержані безпосередньо в процесі експерименту

№ зразку ВНТ та вуглецевого сорбенту	m, г	ρ , г/см ³	Час* (хв., год.)	V(H ₂), см ³	V(H ₂)/m при 300 °С, см ³ /г	Походження зразку
№ 1	10,648	0,266	65 хв. (**)	91,0	8,5	Продукти повітряної конверсії природного газу; 2 пластини Х18Н10Т, одна зашкурена до блиску, закалені при t = 700°C протягом 40 хв; ВНТ вирощувались при t = 650°C протягом 5 год; склад конвертованого газу: Н ₂ – 38,60%, СО – 20,73 %, СО ₂ – 0,82%, N ₂ – 39,86%.
			3 год.	94,5	8,9	
			8 год.	99,5	9,3	
№ 2	19,136	0,478	70 хв. (**)	49,0	2,6	Продукти повітряної конверсії природного газу; 1 пластина Х18Н10Т, закалена при t = 450°C протягом 30 хв; ВНТ вирощувались при t = 650°C протягом 32 год; склад конвертованого газу: Н ₂ – 29,7%, СО – 17,0%, СО ₂ – 2,7%, N ₂ – 50,6%.
			2 год.	53,8	2,8	
			3-8 год.	54,0	2,8	
№ 3	4,516	0,113	70 хв. (**)	42,0	9,3	Продукти повітряної конверсії природного газу; 2 зашкурені до блиску пластини Х18Н10Т, закалені при t = 300°C протягом 20 хв, потім відновлені при t = 300°C протягом 1 год; ВНТ вирощувались при t = 550°C протягом 4 год; склад конвертованого газу: Н ₂ – 38,72%, СО – 20,85%, СО ₂ – 0,81%, N ₂ – 39,62%.
			3 год.	89,0	21,4	
			5 год.	99,0	21,9	
№ 4	13,572	0,339	75 хв. (**)	97,5	7,2	Продукти повітряної конверсії природного газу; пластина Ст3 та нержавіюча фольга, вкрита шаром окисленого залізного порошку; ВНТ вирощувались при t = 650°C протягом 4 год; склад конвертованого газу: Н ₂ – 36%, СО – 14%, СН ₄ – 1,5%.
			7 год.	228,4	16,8	
№ 5	13,535	0,338	75 хв. (**)	78,0	5,8	Продукти повітряної конверсії природного газу; 2 пластини Х18Н10Т, вкриті розчином ферроцену С ₁₀ Н ₁₀ Fe в скипидарі; ВНТ вирощувались при t = 650°C протягом 4 год; склад конвертованого газу: Н ₂ – 38,14%, СО – 18,76%, СО ₂ – 2,07%, N ₂ – 47,03%.
			7 год.	227,0	16,8	
№ 6	10,442	0,261	75 хв. (**)	44,8	4,3	Продукти повітряної конверсії пропан-бутану; 2 пластини Х18Н10Т; ВНТ вирощувались при t = 650°C протягом 3 год; склад конвертованого газу: Н ₂ – 24,91%, СО – 19,21%, СО ₂ – 2,12%, N ₂ – 53,76%.
			8 год.	137,4	13,2	
№ 7	10,533	0,263	65 хв. (**)	57,4	5,4	Продукти повітряної конв. пропан-бутану; 2 пластини Х18Н10Т; ВНТ вирощувались при t = 650°C протягом 4 год; склад конвертованого газу: Н ₂ – 26,40%, СО – 20,97%, СО ₂ – 2,87%, N ₂ – 49,76%.
			8 год.	113,4	10,8	
№ 8	14,500	0,363	65 хв. (**)	51,0	3,5	Продукти повітряної конверсії пропан-бутану; 2 пластини Х18Н10Т, закалені при t = 700°C протягом 30 хв; ВНТ вирощувались при t = 650°C протягом 4 год; склад конвертованого газу: Н ₂ – 26,40%, СО – 20,97%, СО ₂ – 2,87%, N ₂ – 49,76%.
			8 год.	92,2	6,3	
№ 9	9,824	0,246	70 хв. (**)	73,4	7,5	Азотвмісна смола
			2 год.	77,6	7,9	
			4 год.	78,0	7,9	
№ 10	7,075	0,177	75 хв. (**)	52,2	7,4	Фенол
			2 год.	55,0	7,7	
			7 год.	41,1	5,8	
№ 11	8,469	0,212	70 хв. (**)	55,8	6,6	Нафтовий пек
			1,5 год.	57,0	6,7	
			3 год.	57,0	6,7	
№ 12	11,182	0,280	80 хв. (**)	83,0	7,4	Лушпиння кокосу
			2 год.	86,0	7,7	
			6 год.	79,0	7,1	

* – час десорбції; ** – час досягнення температури 300 °С

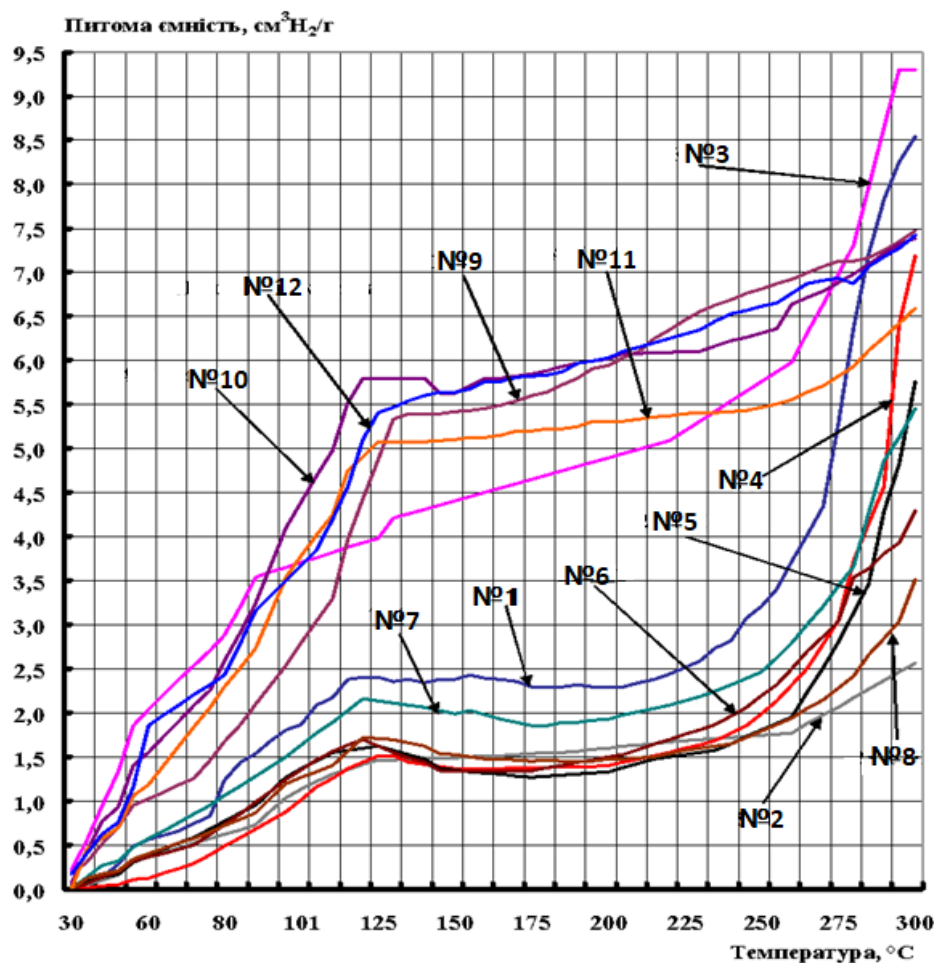


Рис. 3. Характер десорбції H_2 зі зразків сорбентів під час підвищення температури десорбції до $300^\circ C$

Під час проведення експериментів з нанотрубками помічено явище «зворотної» десорбції, тобто в інтервалі $125\text{--}250^\circ C$ кількість десорбованого водню зменшується, що на даний момент не знаходить переконливого пояснення. Очевидно, для розуміння цієї аномалії потрібні додаткові експерименти за спеціальною методикою.

У цілому отримані результати показують необхідність проведення додаткових аналізів наносорбентів методами атомно-силової мікроскопії, термогравіметрії, вивчення поведінки кривих сорбції – десорбції, а також раман-спектрометрії.

Висновки. Експериментально визначено водневу ємність трьох груп адсорбентів: (а) нанотрубки з природного газу; (б) із пропан-бутану; (в) наносорбенти з біосировини з високо розвинутою питомою поверхнею. Установлено, що кількість H_2 за десорбції у групах (а, б) істотно збільшується через 7–8 годин порівняно з кількістю H_2 за досягненні $300^\circ C$: від 9,3% (№ 1) до

191% (№ 5) – група (а) та від 81% (№ 8) до 207% (№ 6) – група (б). У групі (в) десорбція закінчується через 70–80 хв. за досягнення $300^\circ C$. Найбільша питома ємність спостерігалася для зразків № 6, № 5, № 4, № 3. Причому для зразка № 3 найвища питома ємність становила $21,9\text{ см}^3(H_2)/г$ за $300^\circ C$, або $14,8\text{ см}^3(H_2)/г$ в перерахунку на нормальні умови. У зразках групи (в) спостерігалася явище «зворотної» десорбції, коли після досягнення максимуму через 7 год. (із фенолу) або 6 год. (із лущиння кокосу) кількість водню зменшувалася.

ЛІТЕРАТУРА

1. Vavrysh A. et al. Production of carbon nanomaterials for hydrogen storage, NANOCON. Brno 2014. 416–420 p.
2. Midilli A. et al. On hydrogen and hydrogen energy strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005. 255–271 p.
3. Chen Y. et al. Tiny PdCo core-shell nanoparticles confined inside a metal-organic framework for highly efficient catalysis. Small. 2015. 71–76 p.

4. Hwang H.T., Varma A. Hydrogen storage for fuel cell vehicles. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2014. 42–48 p.
5. Термодинамічний аналіз методів забезпечення автотермічності процесів повітряної газифікації комбінованих палив / О. Снігур та ін. 2018. С. 401–438.
6. Brar J.S. et al. Cogasification of Coal and Biomass: A Review *International Journal of Forestry Research Volume*. 2012. P. 24–38.
7. Janhall S. et al. Release of carbon nanotubes during combustion of polymer nanocomposites in a pilot-scale facility for waste incineration. *NanoImpact*. 2021. P. 1–8.
8. Chen X., Wang Y., Zhang L. Recent progress in the chemical upcycling of plastic wastes, *ChemSusChem*. 2021. P. 4137–4151.
9. Al-Salem S. et al. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW), *J. Environ. Manag.* 2017. P. 177–198.
10. Hopewell J., Dvorak R., Kosior E. Plastics recycling: challenges and opportunities, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 364 2009. P. 2115–2126.
11. Williams P., Hydrogen and carbon nanotubes from pyrolysis-catalysis of waste plastics: a review, *Waste Biomass Valoriz.* 12. 2021. P. 1–28.
12. Zheng Y. et al. S. Zhang, Synthesis of carbon nanotube arrays with high aspect ratio via Ni-catalyzed pyrolysis of waste polyethylene, *Nanomaterials* 2018. P. 556–568.
13. Li K. et al. Catalytic preparation of carbon nanotubes from waste polyethylene using FeNi bimetallic nanocatalyst, *Nanomaterials* 10. 2020. P. 1500–1517.
14. Wu C. et al. Processing real-world waste plastics by pyrolysis-reforming for hydrogen and high-value carbon nanotubes, *Environ. Sci. Technol.* 48. 2014. P. 819–826.
15. Panda A., Singh R., Mishra D. Thermolysis of waste plastics to liquid fuel A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products—a world prospective, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2010. P. 233–248.
16. Papari S., Bamdad H., Berruti F. Pyrolytic conversion of plastic waste to value added products and fuels: a review, *Materials* 14. 2021. P. 258–270.
17. De Volder M. et al. Carbon nanotubes: present and future commercial applications, *Science* 339. 2013. P. 535–539.
18. Zhu Y., et al. Carbon nanotubes production from real-world waste plastics and the pyrolysis behaviour. *Waste Management* 166. 2023. P. 141–151.
19. Wu C., Williams, P. Investigation of Ni-Al, Ni-Mg-Al and Ni-Cu-Al catalyst for hydrogen production from pyrolysis-gasification of polypropylene. *Appl. Catal. B: Environ.* 90. 2009. P. 147–156.
20. Nahil, M., Wu C., Williams, P., Influence of metal addition to Ni-based catalysts for the co-production of carbon nanotubes and hydrogen from the thermal processing of waste polypropylene. *Fuel Process. Technol.* 130. 2015. P. 46–53.
21. Ansari, R. et al. Forced vibration analysis of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates using a numerical strategy. *Physica E: Low Dimens. Syst. Nanostruct.* 69. 2015. P. 294–305.
22. Wua C. et al. Process Safety and Environmental Protection 103. 2016. P. 107–114.
23. Berkman A. et al. Synthesis of branched, nano channelled, ultrafine and nano carbon tubes from PET wastes using the arc discharge method. *Waste Management*, 34(11). 2014. P. 2139–2145.
24. Debnath B., Ghosh S. Carbon Nanotubes as a Resourceful Product Derived from Waste Plastic-A Review: Proceedings of 6th IconSWM. 2016. P. 915–933.

HYDROGEN ADSORPTION AND DESORPTION ON CARBON NANOTUBES

Valeriia Hlushchuk

Master's Student at the Department of Ecology and Plant Polymer Technology
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Beresteiskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, gvmars@gmail.com

Oleksandr Snigur

Researcher at the Department of Thermochemical Processes and Nanotechnologies
Institute of Gas of the National Academy of Sciences of Ukraine, 39 Degtyarivska str., Kyiv, Ukraine, 03113, snigurec@gmail.com

Olena Ivanenko

Doctor of Technical Science, Associate Professor at the Department of Ecology and Technology of Plant Polymers
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Beresteiskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, olenka.vasaynovich@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6838-5400

Victoria Kovbasyuk

Graduate Student at the Department of Ecology and Technology of Plant Polymers

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37 Beresteiskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, victoriakpi@ukr.net

Yuriy Marchuk

Senior Researcher at the Department of Thermochemical Processes and Nanotechnology

Institute of Gas of the National Academy of Sciences of Ukraine, 39 Degtyarivska str., Kyiv, Ukraine, 03113, marchukYV@nas.gov.ua

Alexey Sezonenko

Researcher at the Department of Industrial Heat Engineering Issues

Institute of Gas of the National Academy of Sciences of Ukraine, 39 Degtyarivska str., Kyiv, Ukraine, 03113, alsez@ukr.net

Carbon nanomaterials, particularly carbon nanotubes, have proven to be promising hydrogen sorbents, contributing to the advancement of hydrogen energy. Furthermore, the utilization of waste materials from various industries can serve as a significant source of carbon materials for the production of carbon nanotubes.

Research in the field of hydrogen adsorption on carbon materials holds great significance in the development of clean energy (REPowerEU) and expedites the transition to «green» energy. Hydrogen is an efficient energy source that can help reduce reliance on carbon fuels and limit greenhouse gas emissions.

The use of carbon nanotubes as hydrogen sorbents indicates the potential for further developments in hydrogen energy and the creation of more robust and productive systems for hydrogen storage and utilization.

The research findings also underscore the importance of exploring and developing new sources of carbon materials that can be employed in the production of carbon nanotubes and other nanomaterials. This opens up new opportunities for using industrial waste and biomass as resources to create efficient materials for hydrogen energy and other critical applications.

This research unveils prospects for harnessing waste materials from various industrial sectors as sources of carbon materials for the production of carbon nanotubes and emphasizes the significance of advancing hydrogen energy as a sustainable energy source.

Additionally, the possibility of hydrogen adsorption-desorption processes in the obtained nanomaterial samples has been examined. The experimental determination of hydrogen capacity for three groups of adsorbents: (a) nanotubes from natural gas, (b) from propane-butane, and (c) nano-sorbents from biomass with a highly developed specific surface area, reveals that the highest specific capacity was 14.8 cm³(H₂)/g, recalculated under standard conditions, for the nanotube sample derived from the products of air conversion of natural gas with the highest hydrogen content. These results emphasize the potential of carbon nanotubes as efficient hydrogen sorbents and underscore the importance of further research in this direction for the development of hydrogen energy and the creation of durable energy systems.

Key words: CNTs, carbon nanotubes, hydrogen storage, sorption, nanomaterials, hydrogen sorbents, adsorption capacity.

REFERENCES

1. Vavrysh A., Nebesniy A., Bondarenko B., Khovavko A., Snigur A., & Sviatenko O. (2014). Production of carbon nanomaterials for hydrogen storage, NANOCON, pp. 416–420.
2. Midilli A., Ay M., Dincer I., & Rosen M. (2005). On hydrogen and hydrogen energy strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 255–271.
3. Chen Y., Xu Q., Yu S., & Jiang H. (2015). Tiny PdCo core-shell nanoparticles confined inside a metal-organic framework for highly efficient catalysis. *Small*. pp. 71–76.
4. Hwang H. T., & Varma A. (2014). Hydrogen storage for fuel cell vehicles. *Current Opinion in Chemical Engineering*. pp. 42–48.
5. Snihur, O., Prazhennik, Yu., Marchuk, Yu., & Bondarenko, B. (2018) Thermodynamic Analysis of Methods for Ensuring Autothermicity in the Gasification of Mixed Fuels). 401–438 p.
6. Brar J.S., Singh K., Wang J., & Kumar S. Cogasification of Coal and Biomass: A Review *International Journal of Forestry Research Volume*, (2012). pp. 24-38.
7. Janhall S., Petersson M., Davidsson K., Oman T., & Sommertune J., (2021). Release of carbon nanotubes during combustion of polymer nanocomposites in a pilot-scale facility for waste incineration. *NanoImpact*. pp. 1-8.
8. Chen X., Wang Y., & Zhang L. (2021). Recent progress in the chemical upcycling of plastic wastes, *ChemSusChem*. pp. 4137–4151.
9. Al-Salem S., Antelava A., Constantinou A., & Manos G., (2017). A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW), *J. Environ. Manag.* pp. 177–198.

10. Hopewell J., Dvorak R., & Kosior E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 364. pp. 2115–2126.
11. Williams P., (2021) Hydrogen and carbon nanotubes from pyrolysis-catalysis of waste plastics: a review, *Waste Biomass Valoriz.* 12. pp. 1–28.
12. Zheng Y., Zhang H., Ge S., Song J., & J. Wang, (2018) S. Zhang, Synthesis of carbon nanotube arrays with high aspect ratio via Ni-catalyzed pyrolysis of waste polyethylene, *Nanomaterials* 8. pp. 556–568.
13. Li K., Zhang H., Zheng Y., & Yuan G. (2020). Catalytic preparation of carbon nanotubes from waste polyethylene using FeNi bimetallic nanocatalyst, *Nanomaterials* 10. pp. 1500–1517.
14. Wu C., Nahil M., Miskolczi N., & Huang J. (2014). Processing real-world waste plastics by pyrolysis-reforming for hydrogen and high-value carbon nanotubes, *Environ. Sci. Technol.* 48. pp. 819–826.
15. Panda A., Singh R., & Mishra D., (2010). Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products—a world prospective, *Renew. Sustain. Energy Rev.* pp. 233–248.
16. Papari S., Bamdad H., & Berruti F., (2021). Pyrolytic conversion of plastic waste to value added products and fuels: a review, *Materials* 14. pp. 258–270.
17. De Volder M., Tawfick S., Baughman R., & Hart A. (2013). Carbon nanotubes: present and future commercial applications, *Science* 339. pp. 535–539.
18. Zhu Y., Miao J., Zhang Y., & Li C. (2023). Carbon nanotubes production from real-world waste plastics and the pyrolysis behaviour. *Waste Management* 166. pp. 141–151.
19. Wu C., & Williams, P. (2009). Investigation of Ni-Al, Ni-Mg-Al and Ni-Cu-Al catalyst for hydrogen production from pyrolysis-gasification of polypropylene. *Appl. Catal. B: Environ.* 90. pp. 147–156.
20. Nahil, M., Wu C., & Williams, P., (2015). Influence of metal addition to Ni-based catalysts for the co-production of carbon nanotubes and hydrogen from the thermal processing of waste polypropylene. *Fuel Process. Technol.* 130. pp. 46–53.
21. Ansari, R., Hasrati, E., Faghieh Shojaei, M., & Gholami, R. (2015). Forced vibration analysis of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates using a numerical strategy. *Physica E: Low Dimens. Syst. Nanostruct.* 69. pp. 294–305.
22. Wua C., Nahil M., Miskolczi N., Huang J., & Williams P. (2016). *Process Safety and Environmental Protection* 103. pp. 107–114.
23. Berkman, A., Jagannatham, M., Priyanka, S., & Haridoss, P. (2014). Synthesis of branched, nano channelled, ultrafine and nano carbon tubes from PET wastes using the arc discharge method. *Waste Management*, 34(11). pp. 2139–2145.
24. Debnath B., & Ghosh S. (2016). Carbon Nanotubes as a Resourceful Product Derived from Waste Plastic-A Review: *Proceedings of 6th IconSWM.* pp. 915–933.

Стаття надійшла 01.08.2023