

УДК 665.73:54-41

ТЕХНОЛОГІЧНА СУТНІСТЬ ОТРИМАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ СОРБЕНТІВ НА ОСНОВІ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ ТА ЇХ ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

О. М. Калівощко, М. Ф. Калівощко

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Стаття з спеціальності: 162 – біотехнології та біоінженерія.

Кореспонденція авторів: alek-k@ukr.net; m.f.kalivoshko@gmail.com.

Історія статті: отримано – червень 2021, акцептовано – листопад 2021, опубліковано – 17 грудня 2021 року.
Бібл. 23, рис. 5, табл. 2.

Анотація. Показано, що в зв'язку з стрімким зростанням кількості транспортних засобів збільшуються об'єми використання паливо-мастильних матеріалів, які попри всі заходи та засоби перестороги, через розливи та проливи забруднюють шкідливими та токсичними продуктами навколишнє середовище. Досліджено, як нафтопродукти та продукти їх розпаду, що потрапляють в довкілля, забруднюють ґрунт та воду. Ефективність очищення ґрунтів і води залежить від способу, технології, методу, засобів та прийомів. Особливої популярності та поширення очищення ґрунтів і води від забруднення набуває метод сорбції (поглинання). Проаналізовано, як методом сорбції, за відносно невисоких витрат, забезпечується ефективне очищення ґрунту і води від нафтопродуктів. Обґрунтовано технології отримання вуглецевих сорбентів методом карбонізації з побічної продукції рослинного походження (тирси, солом, листя), об'єми яких для синтезу вуглецевих сорбентів практично не обмежені. Висвітлено сутність процесу карбонізації вуглецевих сорбентів на основі рослинної сировини. Подані фізичні, хімічні, структурні, сорбційні та поглинальні характеристики рослинної сировини та отриманих з неї вуглецевих сорбентів. Розкриті екологічні, економічні переваги та ефективність вуглецевих сорбентів рослинного походження для очищення від нафтопродуктів, в порівнянні з іншими методами очищення.

Ключові слова: вуглецеві сорбенти, довкілля, екологічна безпека, економічні показники, карбонізація, нафтопродукти, сорбенти, сорбційна ємність.

Постановка проблеми

Нафтопродукти це поширені забруднювачі біосфери [1]. Як вказує [2], при використанні нафтопродуктів, значна їх частина потрапляє в навколишнє середовище [3]. Небезпеку становлять не лише нафтопродукти та продукти їх розпаду, а також домішки, які вони можуть містити [4]. При потрапленні в ґрунт та воду, не лише нафтопродукти, але і продукти їх розпаду [5], що утворюються в

наслідок хімічних реакцій та біологічних перетворень [6], здатні перетворюватися в токсичні речовини та завдавати шкідливого впливу біоті. Очищення ґрунту та води від нафтопродуктів методом сорбції екологічно, економічно вигідне та ефективне [7]. Особливої ролі, поширення та значення набувають вуглецеві сорбенти на основі рослинної сировини [8]. Дослідження технологічної сутності процесів карбонізації, коли сировиною являється побічна продукція рослинного походження [9], фізико-хімічних [10] та поглинальних властивостей вуглецевих сорбентів [11], процесів сорбції ними нафтопродуктів [12], екологічної [13] та економічної їх оцінки потребують подальшого аналізу [14] та досліджень [15].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Водне та ґрунтове середовища надзвичайно складні природні комплекси довкілля з широким спектром складних взаємозв'язків та взаємовідносин між живими організмами та середовищем їх існування, що склалися в процесі еволюції та розвитку [16]. Вони невід'ємна частина біосфери в якій відбуваються стабільні, багатосторонні та взаємопов'язані перетворення процесів життєдіяльності [12]. Широке застосування продуктів нафтопереробки та збільшення їх використання, призвело до значного забруднення ними довкілля [2, 17], що викликало значні природні та екологічні зміни водного та ґрунтового середовищ [1, 2 9, 18]. Нафтопродукти та продукти їх розпаду і перетворень стали дієвими забруднювачами довкілля, в першу чергу, ґрунту та води [1, 19]. Очищення ґрунтових та водних екосистем, що зазнали забруднення в процесі їх використання, методом сорбції не втратило своєї актуальності [13, 14, 20]. Сорбенти як доступні, ефективні та безпечні засоби очищення були, а в останні десятиліття набувають ще більшого застосування в усіх сферах виробничої діяльності, в тому числі і для очистки ґрунтів і води від нафтопродуктів [3, 9, 21]. Увага приділяється як технологічній суті отримання, будові, властивостям

вуглецевих сорбентів з побічної продукції сільського та комунального господарства, деревообробної промисловості, так і їх застосуванню. [5, 6, 7, 8, 10, 11]. На високу ефективність, доступність, екологічну безпечність та доцільність використання вуглецевих сорбентів, коли сировиною для їх отримання є різноманітна побічна продукція рослинного походження, що накопичується безпосередньо в процесі виробництва вказують [8, 10, 11, 22, 23]. Проте, природа отримання сорбентів, в процесі перетворення побічної продукції рослинного походження, її вплив на комплексне використання різних видів вуглецевих сорбентів для очищення водних і ґрунтових екосистем, їх сорбційну, екологічну і економічну характеристики та оцінку, недостатньо глибоко вивчено.

Мета досліджень

Метою наших досліджень було вивчення: технологічної сутності, техніки процесів та технологій при отриманні вуглецевих сорбентів з побічної продукції рослинного походження; фізико-хімічних, структурних, сорбційних, поглинальних характеристик рослинної сировини та отриманих з неї вуглецевих сорбентів; повноти очищення, екологічної, економічної переваги та ефективності використання вуглецевих сорбентів при очищенні водного середовища і ґрунтів від нафтопродуктів.

Результати досліджень

Тирса дерев, що є побічною продукцією деревообробної промисловості, солома, полови, як вторинна сировина сільськогосподарського виробництва, листя дерев мають високі сорбційні властивості. Вони, як сорбенти, можуть, при потребі, застосовуватися для очищення від забруднення нафтопродуктами ґрунту та води. За даними (рис. 1), нафтоємність та поглинальні характеристики найвищі у тирси з різних порід дерев, що мали вологість 60%, а найнижчі – у листя дерев.

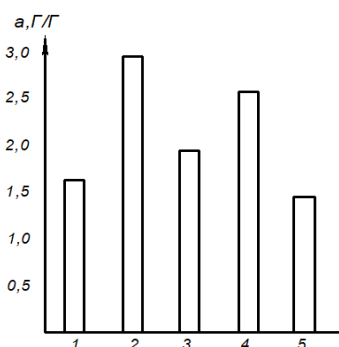


Рис. 1. Величина нафтоємності тирси сосни різних фракцій при вологості 50–60%: 1 – солома; 2 – тирса сосни; 3 – тирса берези; 4 – тирса горіха; 5 – листя дерев

Fig. 1. The oil capacity value of the pine sawdust various fractions at a humidity of 50–60%: 1 – straw, 2 – pine sawdust, 3 – birch sawdust, 4 – walnut sawdust, 5 – leaves.

Різниця в поглинальних властивостях вихідної сировини рослинного походження обумовлена, перш за все, наявністю складних сполук, основу яких становить вуглеводні, такі як геміцелюлоза, целюлоза, лігнін. За даними таблиці 1, вміст геміцелюлози, целюлози та лігніну найвищий у тирси хвойних порід. Особливо важлива роль належить смолистім сполучі лігніну в сорбції різних речовин. У тирсі листяних порід вміст геміцелюлози, целюлози та лігніну значно нижчий ніж у тирси сосни. Солома злакових та листя дерев, у порівнянні з тирсою сосни, містять аналогічних складних вуглеводних, відповідно, у декілька раз менше, а тому вони і мають найменшу нафтоємність.

Таблиця 1. Відсоткове співвідношення вуглеводневих тканин у рослинній сировині.

Table 1. Percentage of hydrocarbon tissues in plant material.

№ п/п	Компоненти	Породи дерев		Солома злакових рослин	Листя дерев
		хвойні	листяні		
1	геміцелюлоза	до 42	до 31	до 18	до 16
2	целюлоза	46-51	36-41	34-36	до 21
3	лігнін	22-31	до 25	до 16	до 6

При використанні сорбентів рослинного походження для очищення ґрунтів і водного середовища від нафтопродуктів доцільно враховувати не лише їх сорбційні та поглинальні характеристики, а також практичність застосування. Листя дерев, через малу масу, легко переноситься (зноситься) вітром, тому на практиці, при вітряній погоді, його важко застосовувати для очищення.

За результатами проведених нами досліджень та інших дослідників [3, 4, 8], сорбенти мають відносно високу ефективність очищення ґрунту і води, коли їх сорбційна ємність дорівнює 2-3 г мг-екв /г та більше. Як свідчать дані рисунку 1, повністю відповідає таким сорбційним вимогам лише тирса сосни та в певній мірі горіха.

Суттєво підвищує сорбційні властивості матеріалів рослинного походження процес карбонізації.

Карбонізація – процес отримання вуглецевих сорбентів з рослинної сировини при її нагріванні понад 120°C.

Сутність процесу карбонізації в тому, що вуглеводнева частина побічної продукції рослинної природи, яка складається з геміцелюлози та целюлози, при карбонізації, в процесі деструкції полімерних ланцюгів, розкладається з виділенням різних смолистих речовин складної будови та великої кількості простих летких сполук.

Процес карбонізації досліджувався нами, через кожні 50 °C, в інтервалі від 100 до 500 °C.

Нами встановлено, що процес карбонізації, в усіх видах рослинної сировини, розпочинається при температурі 120-130 °C. Головні реакції розпаду целюлози протікають в межах температур 200-250 °C,

а лігніну в діапазоні 250-300 °С, що супроводжуються виділенням простих вуглецевих сполук (вуглекислого газу і оксиду вуглецю), зрідженої суміші та смол. Слід відзначити, що на різних стадіях процесу карбонізації величина енергії активації деструктивних перетворень змінюється, тому що при різних температурних діапазонах відбувається розклад різних компонентів рослинних тканин, а саме, геміцелюлози, а в подальшому целюлози і лігніну.

Отримані нами результати вказують на складність та багатогранність процесу карбонізації. Цей процес, мабуть, складається з комплексної сукупності елементарних та складних радикальних реакцій, що різняться кінетичними параметрами.

Особлива роль та значення при сорбції різного роду забруднювачів, в тому числі і нафтопродуктів, належить лігніну. Його вміст як у вихідній сировині рослинного походження, так відповідно і в отриманих з неї вуглецевих сорбентах, відіграє важливу роль в сорбційних та поглинальних характеристиках сорбентів, через особливий склад смолистих речовин.

Процес карбонізації, в певній мірі, залежить від типу рослинної сировини. На перших стадіях процесу карбонізації (до 350 °С) тирси з різних порід дерев, внаслідок випаровування вологи, вилучення летких простіших сполук та смолистих складових, утворюються в великій кількості пори, що обумовлює підвищення її сорбційної ємності нафтопродуктів до певного максимального значення. При подальшій карбонізації (350-500 °С), коли температура суттєво зростає, очевидно, через вигорання вуглецю та, відповідно, збільшення кількості макропор та зменшення мікропор, що змінює структуру карбонізаторів у сторону зменшення мікропористості та знижує сорбційну ємність. В соломі і листі дерев зміни в процесі карбонізації розпочинаються при дещо нижчій температурі і закінчуються до 280-300 °С. Карбонізація при температурі понад 300 °С, як і у тирсі дерев, через зменшення кількості мікропор в карбонізаті, знижує сорбційні властивості отриманих вуглецевих сорбентів. Тому, під впливом високих температур, частково деградує пориста структура вуглецевих сорбентів та змінюються її властивості, що приводить до зниження сорбційної ємності карбонізату. Оптимальним режимом карбонізації тирси з різних порід дерев є 300 (± 10 °С) та час 8-10 хвилин, а для соломи і листя дерев 250 °С.

При визначенні оптимального режиму карбонізації рослинної сировини приділяється увага як якісним характеристикам вуглецевих сорбентів, що проявляється в сорбційних та поглинальних властивостях, так і виходу її кількості, тобто маси.

Дослідження процесу карбонізації листя дерев здійснювали при температурі 250, 300 та 450 °С та при тривалості процесу карбонізації від 3 до 9 хвилин, через кожні 3 хвилини.

В результаті карбонізації вага листя зменшується, що графічно показано на рисунку 2. З кінетичних кривих втрати вологи (рис. 2), при різних режимах термообробки, видно, що карбонізацію листя не доцільно здійснювати до випалу більше 60%, тому що зменшується вихід карбонізату та відбувається деградація пористої структури.

втрата ваги(%)

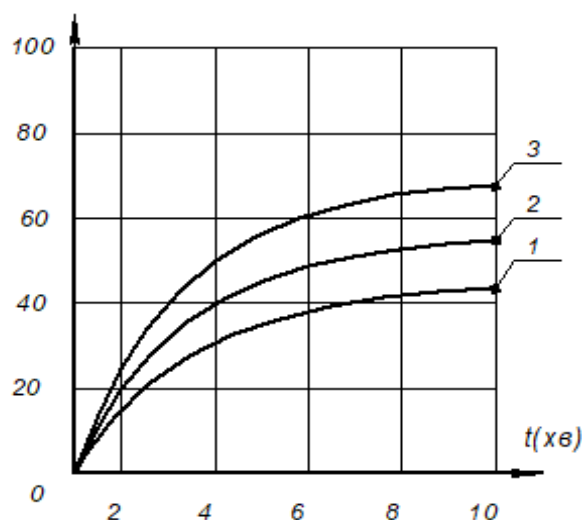


Рис. 2. Кінетичні криві карбонізації зразків листя дерев при температурі (°С): 1 – 250, 2 – 300, 3 – 450

Fig. 2. Kinetic curves of carbonization of tree leaf samples at temperature (°C): 1 – 250, 2 – 300, 3 – 450

Карбонізацію соломи проводили при температурі 250–450°С, з інтервалом 100 °С, та при тривалості процесу карбонізації від 3 до 9 хвилин, через кожні 3 хвилини.

В результаті карбонізації вага соломи зменшується, що графічно показано на рисунку 3. Кінетичні криві втрати вологи соломи (рис. 3), при різних режимах термообробки, показують, що карбонізацію соломи не слід здійснювати до випалу понад 70%, тому що зменшується як вихід карбонізату, так і відбувається деградація мікропор.

втрата ваги(%)

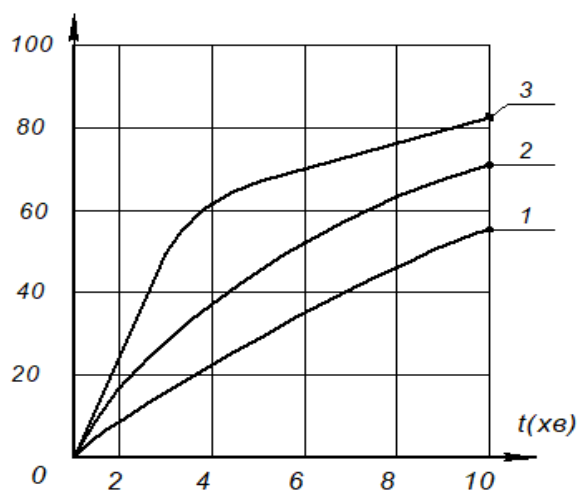


Рис. 3. Кінетичні криві карбонізації зразків соломи злакових культур при температурі (°С): 1 – 250, 2 – 350, 3 – 450.

Fig. 3. Kinetic curves of carbonization of cereal straw samples at temperature (°C): 1 – 250, 2 – 350, 3 – 450.

Процес карбонізації тирси хвойних і листяних порід дерев досліджували при температурі 250–450°С, з інтервалом 50 °С та при тривалості процесу карбонізації від 3 до 9 хвилин, через кожні 3 хвилини.

В результаті карбонізації вага тирси зменшується, що графічно показано на рис. 4, рис. 5. З кінетичних кривих втрати вологи (рис. 4, рис. 5), видно, що при всіх режимах термообробки, карбонізацію тирси не доцільно здійснювати до випалу більше 70-75%, тому що зменшується вихід карбонізату та відбувається деградація пористої структури.

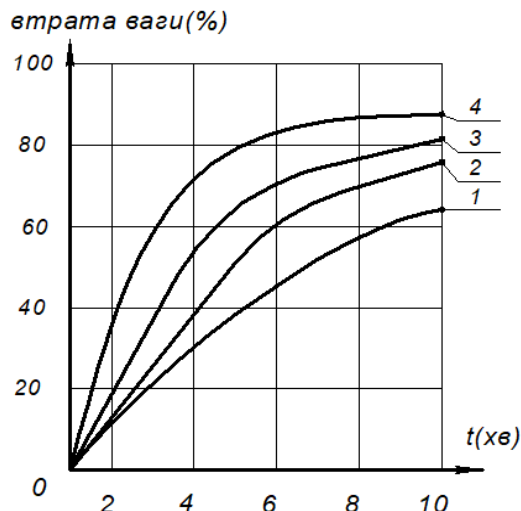


Рис. 4. Кінетичні криві карбонізації зразків тирси горіха при температурі ($^{\circ}\text{C}$): 1 – 250, 2 – 300, 3 – 350, 4 – 450.

Fig. 4. Kinetic curves of carbonization of walnut sawdust samples at temperature ($^{\circ}\text{C}$): 1 – 250, 2 – 300, 3 – 350, 4 – 450.

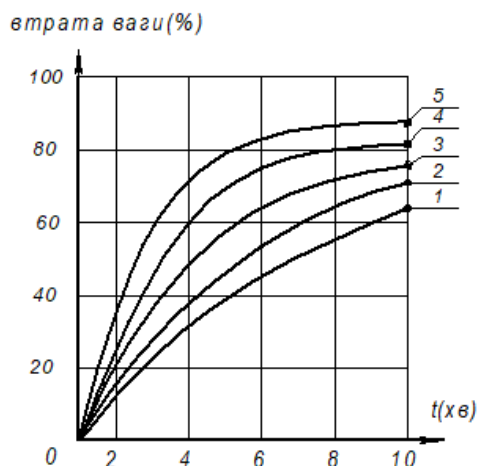


Рис. 5. Кінетичні криві карбонізації зразків тирси сосни при температурі ($^{\circ}\text{C}$): 1 – 250, 2 – 300, 3 – 350, 4 – 400, 5 – 450.

Fig. 5. Kinetic curves of carbonization of pine sawdust samples at temperature ($^{\circ}\text{C}$): 1 – 250, 2 – 300, 3 – 350, 4 – 400, 5 – 450.

Дослідження процесу карбонізації рослинної сировини різного походження дозволило встановити, що при кожній досліджуваній температурі, режим її карбонізації має певне оптимальне значення тривалості, при якому нафто ємність отриманого карбонізату є максимальною.

За результатами наших досліджень, вуглецеві сорбенти, що отримані шляхом карбонізації рослинної сировини, мають кращі фізико-хімічні та структурні

показники, нафто ємність, а величина сорбції до нафтопродуктів зростає в декілька разів, в порівнянні з вихідною продукцією (рис. 6). Слід зазначити, що сорбційна ємність вуглецевих сорбентів з листя та соломи невисока і знаходиться в діапазоні 0,3-0,5 мг-екв/г. В той же час величина сорбції карбонізованих тирси горіха та берези знаходиться у інтервалі 1,9-2,2 мг-екв/г, а максимальні її показники у тирси сосни та досягають 3,5 мг-екв/г. Доречно звернути увагу на те, що нафто ємність вихідної сировини тирси різних порід дерев не дуже різнилася між собою. Проте, карбонізований з тирси сосни має більш ніж у 2 рази вищу нафто ємність, в порівнянні з карбонізатами з тирси горіха та берези.

Таблиця 2. Поглинальні та сорбційні характеристики вуглецевих сорбентів із рослинної сировини, що мала вологість 50-60%.

Table 2. Absorption and sorption characteristics of carbon sorbents from vegetable raw materials with a humidity of 50-60%.

Показник	Тирса			Солома	Листя
	сосни	горіха	берези		
Нафтоємність, г/г	11,2	5,4	4,5	4,2	2,8
$V_s(\text{C}_6\text{H}_6)$, cm^3/g	0,09	0,05	0,04	0,04	0,02
$V_s(\text{H}_2\text{O})$, cm^3/g	0,12	0,09	0,07	0,07	0,04
CO_2 , мг-екв/г	3,6	2,3	2,0	0,5	0,3
$S_{\text{шт}}$, m^2/g	13,1	10,1	10	10,4	6,1
Зольність, %	1	2,1	1	21,2	15,2

Величини нафто ємності та сорбційна здатність вихідної рослинної сировини, які показані на рисунку 1 свідчать, що у тирси сосни та горіха достатньо високі і тому вони можуть безпосередньо використовуватися для поглинання паливно-мастильних матеріалів. Процес термічної обробки рослинної сировини збільшує сорбційну ємність отриманих карбонізованих приблизно у півтора рази, а нафто ємності зростає в 2,3-4,1 рази і досягає у тирси сосни, як найліпшого сорбенту, понад 11 г/г.

Важливе значення для практичного застосування сорбентів має оцінка їх економічної та фінансової ефективності. При використанні побічної сировини рослинного походження в якості сорбентів, витрати при їх застосуванні, пов'язані передусім з їх внесенням, збиранням та утилізацією. При використанні вуглецевих сорбентів, окрім зазначених витрат, отримання вуглецевих сорбентів з побічної продукції рослинного походження пов'язано з додатковими енергетичними затратами, а отже і здорожчанням собівартості сорбентів. Проте, наші дослідження показали, що вносити вуглецеві сорбенти більш раціонально, в порівнянні з побічною сировиною рослинного походження, з яких вони отримані. Вуглецеві сорбенти мають нафто ємність у 3-4 рази вищу, в порівнянні з вихідною сировиною рослинного походження, тому їх вноситься відповідно

в 3–4 рази менше, при тій самій сорбційній та нафтопоглинальній здатності.

Внесення, а особливо збирання, сорбентів складний та, до певної міри, затратний процес. Сумарні витрати на карбонізацію побічної сировини рослинного походження та внесенні значно меншого об'єму вуглецевих сорбентів для знезараження нафтопродуктів, не перевершують затрати на використання в якості сорбентів побічної продукції рослинного походження.

Слід враховувати також, що використання карбонізаторів для поглинання нафтопродуктів, пов'язане як з меншими витратами на застосування (в 3–4 рази менші об'ємами їх внесення та збирання), так і на утилізацію, в порівнянні з побічною продукцією рослинного походження.

Висновки

1. Карбонізація побічної продукції рослинного походження, проведена при температурі в межах 200–300 °C на протязі 8–10 хв., покращує фізичні, хімічні, структурні, поглинальні та сорбційні характеристики вуглецевих сорбентів.

2. Вуглецеві сорбенти отримані методом карбонізації мають вищу сорбційну ємність майже у 1,5, а нафто ємність – 4 рази, в порівнянні з відповідними показниками вихідної продукції рослинного походження.

3. Вуглецеві сорбенти з тирси сосни мають у 1,5–4 рази вищі сорбційні характеристики в порівнянні з карбонізатами отриманими з тирси горіха і берези, соломи та листя дерев.

4. Економічно, фінансово та екологічно, при очищенні ґрунту і води від забруднення нафтопродуктами, більш доцільно використовувати вуглецеві сорбенти, ніж безпосередньо побічну продукцію рослинного походження.

Список літератури

1. Hassan A. Review of the global oil and gas industry: a concise journey from ancient time to modern world. *Petroleum Technology Development Journal*. 2019. Vol. 3(2). P. 123–141.
2. Diemer R. Transport in the European Union – current trends and issues. *Mobility and Transport*. 2019. Vol. B-1049. P. 143–191.
3. Cruz J. F., Matejova L., Pirilä M., Ainassaari K., Canepa C., Mousavi S. M. A comparative study on activated carbons derived from a broad range of agro-industrial wastes in removal of large-molecular-size organic pollutants in aqueous phase (water, air, and soil pollution). *Water Air and Soil Pollution*. 2015. Vol. 226(11). P. 213–235. doi 10.1007/s11270-015-2540-1.
4. Morteza A., Mohammad Reza Masnavi M. R., Khalighi N. Use of natural purification of water cycle and water management as a solution towards eco-design. *Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society*. 2012. Vol. 7. P. 6–18. doi 10.1007/978-94-007-3010-6_18.

5. Koumanova B. Fate of chemicals in the aquatic environment. *Chemicals as Intentional and Accidental Global Environmental Threats*. 2016. Vol. XVIII. P. 93–103.

6. Azat S., Pavlenko V. V., Kerimkulova A. R., Mansurov Z. A. (2012). Synthesis and structure determination of carbonized nano mesoporous materials based on vegetable raw materials. *Advanced Materials Research*. 535. 1041–1045. doi 10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.1041.

7. Pinchevska O., Sedliačik J., Horbachova O., Spirochkin A., Rohovskyi I. Properties of hornbeam (*Carpinus betulus*) wood thermally treated under different conditions. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*. 2019. Vol. 61(2). P. 25–39. doi: 10.17423/afx.2019.61.2.03.

8. Ngene S., Tota-Maharaj K., Eke P., Hills C. Environmental and economic impacts of crude oil and natural gas production in developing countries. *International Journal of Economy, Energy and Environment*. 2016. Vol. 1(3). P. 64–73. doi 10.11648/j.ijeee.20160103.13.

9. Sun Y., Webley P. A. Preparation of activated carbons from corncob with large specific surface area by a variety of chemical activators and their application in gas storage. *Chemical Engineering Journal*. 2010. Vol. 162(3). P. 883–892.

10. Mohan D., Pittman C. U., Steele P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy and Fuels*. 2006. Vol. 20(3). P. 848–889.

11. Rogovskii I. L., Titova L. L., Trokhaniak V. I., Solomka O. V., Popyk P. S., Shvidia V. O., Stepanenko S. P. Experimental studies of drying conditions of grain crops with high moisture content in low-pressure environment. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 57(1). P. 141–146.

12. Ahmad F., Daud W. W., Ahmad M. A., Radzi R. Shell-based activated carbon by CO₂ activation in removing of cationic dye from aqueous solution: kinetics and equilibrium studies. *Chemical Engineering Research and Design*. 2012. Vol. 90(10). P. 1480–1490.

13. Nieto-Delgado C., Rangel-Mendez J. R. In situ transformation of agave bagasse into activated carbon by use of an environmental scanning electron microscope. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2013. Vol. 167. P. 249–253.

14. Haiping Y., Yan R., Chen H., Zheng C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel Journal*. 2007. Vol. 86(12–13). P. 1781–1788. doi 10.1016/j.fuel.2006.12.013.

15. Widner K., Naisse C., Rumpel C., Glaser B. Chemical modification of biomass residues during hydrothermal carbonization. *Organic Geochemistry*. 2013. Vol. 54. P. 91–100. doi 10.1016/j.orggeochem.2012.10.006.

16. Coq L. L., Duga A. Syngas treatment unit for small scale gasification-application to IC engine gas quality requirement. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2012. Vol. 5(1). P. 95–103.

17. Dias J. M., Alvim-Ferraz M., Almeida M. F., Rivera-Utrilla J., Sánchez-Polo M. Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: a review. *Journal of Environmental Management*. 2007. Vol. 85(4). P. 833–846.

18. Klavins M., Porshnov D. Development of a new peat-based oil sorbent using peat pyrolysis. *Environmental Technology*. 2013. Vol. 34(9-12). P. 1577-1582. doi 10.1080/09593330.2012.758668.

19. Kovalenko O., Novoseltseva V., Kovalenko N. Biosorbents – prospective materials for heavy metal ions extraction from wastewater. *Food Science and Technology*. 2018. Vol. 12(1). P. 118-122. doi 10.15673/fst.v12i1.841.

20. Rogovskii I. L., Kalivoshko O. M., Maksimovich K. Yu., Maksimovich E. Yu. Research of mixed carbon sorbents for removal of oil products from water and soil for preservation of environmental infrastructure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 720. P. 012108. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012108>.

21. Rogovskii I. L., Kalivoshko S. M., Voinash S. A., Korshunova E. E., Sokolova V. A., Obukhova I. A., Kebko V. D. Research of absorbing properties of carbon sorbents for purification of aquatic environment from oil products. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 548. P. 062040. doi:10.1088/1755-1315/548/6/062040.

22. Kalivoshko O. M., Kalivoshko M. F. Technical and insurance evaluation of carbon sorbents on basis of vegetable raw materials for purification of petroleum products. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021. Vol. 12. No 2. P. 83-88. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy> 2021.02.083.

23. Kalivoshko O. M., Kalivoshko M. F. Technical and economic evaluation of sawdust of various tree species as sorbents for removing oil product. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021. Vol. 12. No 3. P. 137-142. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy> 2021.03.137.

References

1. Hassan A. (2019). Review of the global oil and gas industry: a concise journey from ancient time to modern world. *Petroleum Technology Development Journal*. 3(2). 123-141.

2. Diemer R. (2019). Transport in the European Union – current trends and issues. *Mobility and Transport*. B-1049. 143-191.

3. Cruz J. F., Matejova L., Pirilä M., Ainassaari K., Canepa C., Mousavi S. M. (2015). A comparative study on activated carbons derived from a broad range of agro-industrial wastes in removal of large-molecular-size organic pollutants in aqueous phase (water, air, and soil pollution). *Water Air and Soil Pollution*. 226(11). 213-235. doi 10.1007/s11270-015-2540-1.

4. Morteza A., Mohammad Reza Masnavi M. R., Khalighi N. (2012). Use of natural purification of water cycle and water management as a solution towards eco-design. *Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society*. 7. 6-18. doi 10.1007/978-94-007-3010-6_18.

5. Koumanova B. (2006). Fate of chemicals in the aquatic environment. *Chemicals as Intentional and Accidental Global Environmental Threats*. XVIII. 93-103.

6. Azat S., Pavlenko V. V., Kerimkulova A. R., Mansurov Z. A. (2012). Synthesis and structure determination of carbonized nano mesoporous materials based on vegetable raw materials. *Advanced Materials Research*. 535. 1041-1045. doi 10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.1041.

7. Pinchevska O., Sedliačik J., Horbachova O., Spirochkin A., Rohovskyi I. (2019). Properties of hornbeam (*Carpinus betulus*) wood thermally treated under different conditions. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*. 61(2). 25-39. doi: 10.17423/afx.2019.61.2.03.

8. Ngene S., Tota-Maharaj K., Eke P., Hills C. (2016). Environmental and economic impacts of crude oil and natural gas production in developing countries. *International Journal of Economy, Energy and Environment*. 1(3). 64-73. doi 10.11648/j.ijeee.20160103.13.

9. Sun Y., Webley P. A. (2010). Preparation of activated carbons from corncob with large specific surface area by a variety of chemical activators and their application in gas storage. *Chemical Engineering Journal*. 162(3). 883-892.

10. Mohan D., Pittman C. U., Steele P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy and Fuels*. 20(3). 848-889.

11. Rogovskii I. L., Titova L. L., Trokhaniak V. I., Solomka O. V., Popyk P. S., Shvidia V. O., Stepanenko S. P. (2019). Experimental studies of drying conditions of grain crops with high moisture content in low-pressure environment. *INMATEH Agricultural Engineering*. 57(1). 141-146.

12. Ahmad F., Daud W. W., Ahmad M. A., Radzi R. (2012). Shell-based activated carbon by CO₂ activation in removing of cationic dye from aqueous solution: kinetics and equilibrium studies. *Chemical Engineering Research and Design*. 90(10). 1480-1490.

13. Nieto-Delgado C., Rangel-Mendez J. R. (2013) In situ transformation of agave bagasse into activated carbon by use of an environmental scanning electron microscope. *Microporous and Mesoporous Materials*. 167. 249-253.

14. Haiping Y., Yan R., Chen H., Zheng C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel Journal*. 86(12-13). 1781-1788. doi 10.1016/j.fuel.2006.12.013.

15. Widner K., Naisse C., Rumpel C., Glaser B. (2013). Chemical modification of biomass residues during hydrothermal carbonization. *Organic Geochemistry*. 54. 91-100. doi 10.1016/j.orggeochem.2012.10.006.

16. Coq L. L., Duga A. (2012). Syngas treatment unit for small scale gasification-application to IC engine gas quality requirement. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 5(1). 95-103.

17. Dias J. M., Alvim-Ferraz M., Almeida M. F., Rivera-Utrilla J., Sánchez-Polo M. (2007). Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: a review. *Journal of Environmental Management*. 85(4). 833-846.

18. Klavins M., Porshnov D. (2013). Development of a new peat-based oil sorbent using peat pyrolysis. *Environmental Technology*. 34(9-12). 1577-1582. doi 10.1080/09593330.2012.758668.

19. Kovalenko O., Novoseltseva V., Kovalenko N. (2018). Biosorbents – prospective materials for heavy

metal ions extraction from wastewater. Food Science and Technology. 12(1). 118-122. doi 10.15673/fst.v12i1.841.

20. Rogovskii I. L., Kalivoshko O. M., Maksimovich K. Yu., Maksimovich E. Yu. (2021). Research of mixed carbon sorbents for removal of oil products from water and soil for preservation of environmental infrastructure. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 720. 012108. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012108>.

21. Rogovskii I. L., Kalivoshko S. M., Voinash S. A., Korshunova E. E., Sokolova V. A., Obukhova I. A., Kebko V. D. (2020). Research of absorbing properties of carbon sorbents for purification of aquatic environment from oil products. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 548. 062040. doi:10.1088/1755-1315/548/6/062040.

22. Kalivoshko O. M., Kalivoshko M. F. (2021). Technical and insurance evaluation of carbon sorbents on basis of vegetable raw materials for purification of petroleum products. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 12(2). 83-88. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy> 2021.02.083.

23. Kalivoshko O. M., Kalivoshko M. F. (2021). Technical and economic evaluation of sawdust of various tree species as sorbents for removing oil product. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 12(3). 137-142. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy> 2021.03.137.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ СОРБЕНТОВ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ И ИХ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

А. Н. Каливошко, Н. Ф. Каливошко

Аннотация. Показано, что в связи со стремительным увеличением количества транспортных средств увеличиваются объемы использования горюче-смазочных материалов, которые вопреки всем средствам и приемам предосторожности, через разливы и проливы загрязняют окружающую среду. Исследовано, как нефтепродукты и продукты их разложения, которые попадают в окружающую среду, загрязняют почву и воду. Эффективность очистки почвы и воды зависит от способа, технологии, метода, средств и приемов. Особую популярность и распространение очистки почв и воды от загрязнения набирает метод сорбции (поглощения). Проанализировано, как методом сорбции, при относительно невысоких затратах, обеспечивается эффективная очистка почвы и воды от нефтепродуктов. Обоснована технология получения углеродных сорбентов методом карбонизации с побочной продукции растительного происхождения (опилки, солома, листья), объемы которых для синтеза углеродных сорбентов практически не ограничены. Освещена сущность процесса карбонизации углеродных сорбентов на основе растительного сырья. Даны физические, химические, структурные, сорбционные и поглощающие характеристики растительного сырья и полученных с него углеродных сорбентов. Раскрыты экологические, экономические преимущества и эффективность углеродных сорбентов

растительного происхождения для очистки от нефтепродуктов, в сравнении с другими методами очистки.

Ключевые слова: углеродные сорбенты, внешняя среда, экологическая безопасность, экономические показатели, карбонизация, нефтепродукты, сорбенты, сорбционная емкость.

TECHNOLOGICAL ESSENCE OF CARBON PRODUCTION SORBENTS BASED ON VEGETABLE RAW MATERIALS AND THEIR ECONOMIC EFFICIENCY

O. M. Kalivoshko, M. F. Kalivoshko

Abstract. It is shown that due to the rapid increase in the number of vehicles, the use of fuels and lubricants is increasing, which, despite all measures and precautions, pollute the environment with harmful and toxic products through spills and spills. It has been studied how oil products and their decomposition products that enter the environment pollute the soil and water. The efficiency of soil and water treatment depends on the method, technology, method, tools and techniques. The method of sorption (absorption) is becoming especially popular and widespread in the purification of soils and water from pollution. It is analyzed how the method of sorption, at relatively low cost, provides effective purification of soil and water from petroleum products. The technologies of obtaining carbon sorbents by the method of carbonization from by-products of plant origin (sawdust, straw, leaves), the volumes of which for the synthesis of carbon sorbents are practically not limited, are substantiated. The essence of the process of carbonization of carbon sorbents on the basis of vegetable raw materials is highlighted. Physical, chemical, structural, sorption and absorption characteristics of plant raw materials and carbon sorbents obtained from it are presented. The ecological, economic advantages and efficiency of carbon sorbents of vegetable origin for purification from oil products, in comparison with other purification methods are revealed.

Key words: carbon sorbents, environment, ecological safety, economic indicators, carbonization, oil products, sorbents, sorption capacity.

О. М. Калівошко ORCID 0000-0003-0417-4529.

М. Ф. Калівошко ORCID 0000-0001-8450-940X.

