

В.І. Мандзюк¹, Р.П. Лісовський², Ю.О. Кулик³, Б.І. Рачій¹, Р.В. Соломовський¹

Вплив термічної модифікації турбостратного вуглецю на його фрактальну структуру

¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ, Україна,
volodymyr.mandzyuk@pnu.edu.ua

²Івано-Франківський національний медичний університет, Івано-Франківськ, Україна

³Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, Україна

Методом низькотемпературної порометрії досліджено фрактальну структуру пористих вуглецевих матеріалів (ПВМ), отриманих термічною модифікацією при різних режимах. Встановлено, що за температур модифікації 300 і 600°C формуються матеріали з розвинутою мікропористою структурою, поверхнева фрактальна розмірність яких становить 2,64. За температур модифікації 400 і 500°C значення фрактальної розмірності поверхні зменшується до значення 2,22 при збільшенні тривалості модифікації, що свідчить про формування майже гладкої поверхні, що зумовлено інтенсивним видаленням атомів карбону з приповерхневих шарів та зменшенням кількості мікропор за рахунок їх переходу в мезопори.

Ключові слова: пористий вуглецевий матеріал, термічна модифікація, низькотемпературна порометрія, питома поверхня, поверхнева фрактальна розмірність.

Подано до редакції 04.10.2023; прийнято до друку 5.02.2024.

Вступ

Розвинена питома поверхня ПВМ є одним із важливих параметрів, що робить їх привабливими для використання в літєвих джерелах струму [1-3] та електрохімічних конденсаторах [4-6] як електродного матеріалу. При карбонізації вихідної сировини досить важко отримати ПВМ з питомою поверхнею понад 500 м²/г і загальним об'ємом пор більше 0,2 см³/г, що обумовлює необхідність додаткової модифікації та обробки таких матеріалів.

До основних методів модифікації та обробки ПВМ належать термохімічні методи [7-9], методи ультразвукової та лазерної обробки [10, 11], а також використання екзо- та ендотемплат [12-14]. При використанні вказаних методів обробки відбувається як зміна параметрів пористої структури вуглецевих матеріалів (питомої поверхні, об'єму пор та їх розподілу за розмірами), так і міняється їх фрактальна будова. У роботі [15] нами було досліджено особливості фрактальної будови ПВМ, отриманих

гідротермальною карбонізацією рослинної сировини, та встановлено як міняється величина поверхневої фрактальної розмірності D_s при зростанні температури карбонізації вихідної сировини. Метою даної роботи є дослідження впливу режимів термічної модифікації (температури і часу) ПВМ на їх фрактальну будову з використанням методу низькотемпературної порометрії.

I. Експеримент

Вихідним матеріалом для термічної модифікації був ПВМ, отриманий гідротермальною карбонізацією рослинної сировини за температури 750°C [15]. Для збільшення питомої поверхні за рахунок видалення із вуглецевої матриці найбільш реакційно-здатних атомів карбону, що взаємодіють із газифікуючими агентами, ПВМ поміщався в камеру, де витримувався впродовж заданого часу в газовому потоці – суміші гарячого повітря і аргону. Основними параметрами процесу були температура $t_{\text{мод}}$ і час $\tau_{\text{мод}}$ модифікації.

Термічна модифікація здійснювалася за температур 300, 400 і 500°C при тривалості 0,5 ÷ 3 год та 600°C при тривалості 0,25 ÷ 1 год. В останньому випадку менші часи модифікації ПВМ обумовлені тим, що при заданій температурі подальша термообробка призводить до повного вигорання матеріалу.

Для отримання ізотерм сорбції ПВМ за температури кипіння азоту ($T = 77$ К) використовували автоматичний сорбгометр Quantachrome Autosorb (Nova 2200e). Перед зйомкою проводили дегазацію зразків у вакуумі за температури 180°C впродовж 20 год. Для визначення загальної питомої поверхні пор S_{BET} використовували метод Брунауера-Еммета-Теллера (БЕТ), питомої поверхні мікропор $S_{мікро}$ – t -метод, поверхня мезопор $S_{мезо}$ розраховувалася як різниця між загальною поверхнею пор та мікропор [16].

Поверхнева фрактальна розмірність D_s ПВМ визначалася шляхом перебудови ізотерми адсорбції азоту згідно рівняння [17]:

$$\ln\left(\frac{V}{V_{mono}}\right) = const + A \left[\ln\left(\ln\left(\frac{p_0}{p}\right)\right) \right], \quad (1)$$

де V – об'єм адсорбованого газу; V_{mono} – об'єм адсорбованого газу, який покриває поверхню зразка моношаром; A – показник степені, який залежить від поверхневої фрактальної розмірності D_s ; p_0/p – відносний тиск. Об'єм моношарового покриття V_{mono} розраховувався згідно методу БЕТ [16]:

$$\frac{1}{W[(p_0/p)-1]} = \frac{1}{W_{mono}C} + \frac{C-1}{W_{mono}C} \cdot \frac{p}{p_0}, \quad (2)$$

де W – маса газу, який адсорбований при відносному тиску p/p_0 ; W_{mono} – маса адсорбованої речовини, що утворює моношар, який покриває всю поверхню; C – константа БЕТ, яка характеризує енергію адсорбції в першому адсорбційному шарі і є показником магнітуди взаємодії адсорбент / адсорбат.

Згідно [18], при взаємодії ПВМ і газу на початковому етапі адсорбції азоту переважають сили Ван-дер-Ваальса. Силами поверхневого натягу на поверхні розділу рідина-газ можна знехтувати. Взаємозв'язок між параметрами A і D_s задається рівністю:

$$D_s = 3A + 3. \quad (3)$$

При подальшій адсорбції починають переважати сили поверхневого натягу між газом і рідиною. У цьому випадку виконується співвідношення:

$$D_s = A + 3. \quad (4)$$

Із рівнянь (3) і (4) слідує, що поверхнева фрактальна розмірність D_s ПВМ може бути визначена на основі необхідного для конкретного випадку рівняння. Межа, яка визначає домінування сил поверхневого натягу чи сил Ван-дер-Ваальса, задається рівнянням [18]:

$$\alpha = 3A + 1. \quad (5)$$

Якщо $\alpha \geq 0$, то переважають сили Ван-дер-Ваальса. За умови $\alpha < 0$ переважають сили поверхневого натягу.

II. Результати експерименту та їх обговорення

За даними низькотемпературної порометрії (рис. 1), ізотерми сорбції для ПВМ, отриманих модифікацією при 300°C за всіх часів модифікації, є однаковими за виглядом і належать до I типу ізотерм, що характерно для мікропористих матеріалів (рис. 1, крива 2). На даних ізотермах наявний гістерезис низького тиску, який, на відміну від вихідного матеріалу, виражений слабше. Найбільш ймовірною причиною такої поведінки може бути зменшення необоротного утримування молекул азоту в порах, розмір яких співмірний із розмірами молекул азоту, за рахунок появи на поверхні частинок вуглецю кисеньвмісних функціональних груп. Для даних матеріалів кількість адсорбованого газу є дещо більшою, ніж для вихідного зразка.

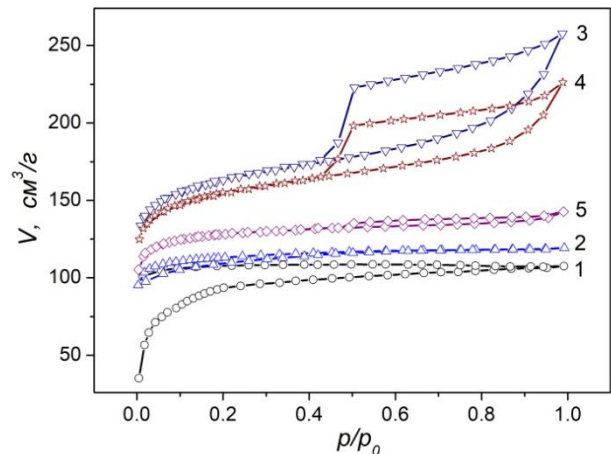


Рис. 1. Ізотерми сорбції азоту вихідного (1) та модифікованих за температур 300 (2), 400 (3), 500 (4) і 600°C (5) ПВМ.

Для ПВМ, модифікованого впродовж 0,5 год за температури 400°C, ізотерма має аналогічний вигляд. Проте, при $t_{mod} = 1 \div 3$ год і $t_{mod} = 500^\circ\text{C}$ для всіх часів модифікації вигляд ізотерм різко міняється. У діапазоні відносних тисків $p/p_0 = 0,42 \div 1$ на ізотермах присутній гістерезис високого тиску. Згідно класифікації IUPAC такий гістерезис належить до типу H4 [16] і пов'язаний із капілярною конденсацією в мезопорах (рис. 1, криві 3 і 4). При збільшенні тривалості модифікації величина гістерезису зростає і становить $\Delta V = 3 \div 43 \text{ cm}^3/\text{g}$ ($t_{mod} = 400^\circ\text{C}$) і $\Delta V = 8 \div 31 \text{ cm}^3/\text{g}$ ($t_{mod} = 500^\circ\text{C}$). Гістерезис низького тиску у даних зразках відсутній.

Для ПВМ, отриманих за температури модифікації 600°C, ізотерма сорбції (рис. 1, крива 5) є подібною до кривих 3 і 4. Проте за рахунок менших часів модифікації гістерезис високого тиску виражений слабше – $\Delta V = 3 \text{ cm}^3/\text{g}$ при $p/p_0 = 0,7$. При $t_{mod} = 1$ год гістерезис відсутній, що свідчить про формування

мікропористого матеріалу.

Подавши ізотерми адсорбції у координатах $\ln(V/V_{mono}) = f\{\ln[\ln(p_0/p)]\}$ (рис. 2) і використавши для розрахунку поверхневої фрактальної розмірності D_s формули (3)-(5), можна встановити, як міняється величина D_s при термічній модифікації ПВМ.

Як видно з рис. 2, на отриманих залежностях спостерігаються лінійні ділянки з різним кутом нахилу, які свідчать про масштабні властивості поверхні матеріалів. При збільшенні відносного тиску кількість молекул нітрогену, адсорбованих в порах, зростає. Як результат, поверхня розділу між адсорбентом і адсорбатом стає гладкішою. У цьому випадку параметр D_s вже не описує межу розділу тверде тіло-газ, а характеризує взаємодію поверхні матеріалу з багатоатомними шарами адсорбованих

молекул нітрогену. Тому перша лінійна ділянка була обрана для коректного визначення поверхневої фрактальної розмірності ПВМ.

За даними проведених розрахунків (табл. 1) для всіх ПВМ параметр α є додатною величиною, що свідчить про домінування у системі адсорбент-адсорбат сил Ван-дер-Ваальса та необхідність використання рівності (3) для знаходження фрактальної розмірності поверхні D_s .

Як слідує з табл. 1, за температури модифікації 300°C відбувається збільшення фрактальної розмірності поверхні. Основною причиною такого зростання є збільшення частки мікропор по відношенню до вихідного матеріалу (згідно даних табл. 2 частка поверхні мікропор зростає до 95 %).

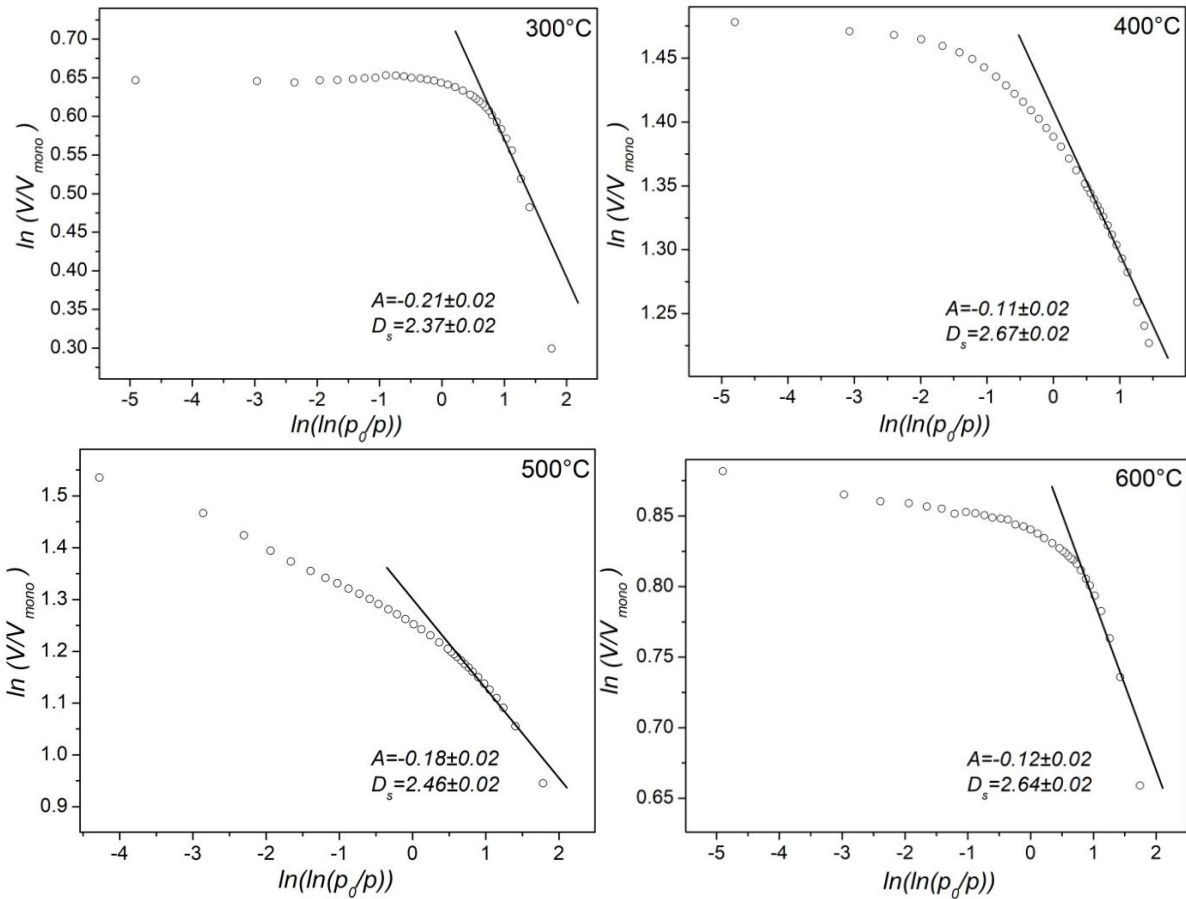


Рис. 2. Залежності $\ln(V/V_{mono}) = f\{\ln[\ln(p_0/p)]\}$ для ПВМ, отриманих за різних температур модифікації при $\tau_{mod} = 1$ год.

Таблиця 1.

Параметри фрактальної структури термічно модифікованих ПВМ

τ_{mod} , год	$t_{mod} = 300^\circ\text{C}$			$t_{mod} = 400^\circ\text{C}$			$t_{mod} = 500^\circ\text{C}$			$t_{mod} = 600^\circ\text{C}$		
	A	α	D_s	A	α	D_s	A	α	D_s	A	α	D_s
0,25										-0,14	0,58	2,58
0,5	-0,26	0,22	2,22	-0,09	0,73	2,73	-0,16	0,52	2,52	-0,13	0,61	2,61
0,75										-0,13	0,61	2,61
1	-0,21	0,37	2,37	-0,11	0,67	2,67	-0,18	0,46	2,46	-0,12	0,64	2,64
1,5	-0,13	0,61	2,61	-0,18	0,46	2,46	-0,20	0,40	2,40			
2	-0,12	0,64	2,64	-0,19	0,43	2,43	-0,22	0,34	2,34			
2,5	-0,12	0,64	2,64	-0,22	0,34	2,34	-0,24	0,28	2,28			
3	-0,11	0,67	2,67	-0,26	0,22	2,22	-0,26	0,22	2,22			

для вихідного матеріалу $A = -0,45$; $\alpha = -0,35$; $D_s = 2,55$.

абсолютна похибка у визначенні параметрів становить $\pm 0,02$.

Таблиця 2.

Параметри пористої структури термічно модифікованих ПВМ

$t_{\text{мод}}, ^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{мод}}, \text{год}$	$S_{\text{БЕТ}}, \text{м}^2/\text{г}$	$S_{\text{мікро}}, \text{м}^2/\text{г}$	$S_{\text{мезо}}, \text{м}^2/\text{г}$	$S_{\text{мікро}}/S_{\text{БЕТ}}, \%$
вихідний	–	343	292	51	86
300	0,5	361	339	51	94
	1	443	425	18	96
	1,5	434	410	24	95
	2	439	418	21	95
	2,5	451	424	27	94
	3	450	423	27	94
400	0,5	433	380	53	88
	1	513	453	60	88
	1,5	542	478	74	88
	2	573	500	73	87
	2,5	614	504	110	82
	3	652	535	117	82
500	0,5	526	463	63	88
	1	623	522	101	84
	1,5	616	519	97	84
	2	653	550	103	84
	2,5	586	492	94	84
	3	479	404	75	84
600	0,25	465	411	54	88
	0,5	497	464	33	93
	0,75	464	441	23	95
	1	457	439	18	96

Проте, ця температура є недостатньою для формування розвиненої мезопористої структури, для якої величина поверхневої фрактальної розмірності є

меншою. Аналогічно, менші часи модифікації вихідного матеріалу за температури 600°C майже не змінюють розмірності поверхні, хоча кількість мікропор, як і у попередньому випадку, зростає до 96 % (табл. 2). Це обумовлено ущільненням структури частинок вуглецю за рахунок компактування мікрообластей, сформованих графеновими шарами.

Для температур модифікації 400 і 500°C спостерігається тенденція до зменшення параметра D_s , при збільшенні тривалості модифікації, що вказує на формування майже гладкої поверхні. Аналогічна ситуація для вказаних температур спостерігалася при дослідженні даних матеріалів методом малокутового розсіяння X-променів (МКХР) (табл. 3), використання якого дало можливість визначити значення поверхневої фрактальної розмірності як відкритих, так і закритих пор [19].

Співставляючи дані МКХР та низькотемпературної порометрії (табл. 4), можна також оцінити частку питомої поверхні відкритих пор k у ПВМ щодо всієї поверхні матеріалу. У даному випадку до відкритих пор належать пори, на поверхні яких адсорбуються молекули азоту.

Із даних табл. 4 слідує, що найбільш суттєвий розвиток відкритої пористої структури спостерігається внаслідок термічної модифікації за температур 400 і 500°C. Термічна модифікація при 300°C є недостатньо ефективною для формування мезопористої структури. Не виключено, що за даної температури відбувається закриття мікропор продуктами реакції, що також обмежує доступ молекул азоту до цієї ділянки ПВМ. Для зразків, модифікованих за температури 600°C, основною

Таблиця 3.

Значення параметра D_s згідно методу МКХР і низькотемпературної порометрії

$\tau_{\text{мод}}, \text{год}$	$t_{\text{мод}} = 300^\circ\text{C}$		$t_{\text{мод}} = 400^\circ\text{C}$		$t_{\text{мод}} = 500^\circ\text{C}$		$t_{\text{мод}} = 600^\circ\text{C}$	
	D_s^*	D_s^{**}	D_s^*	D_s^{**}	D_s^*	D_s^{**}	D_s^*	D_s^{**}
0,25							2,6	2,58
0,5	2,2	2,22	2,8	2,73	2,5	2,52	2,55	2,61
0,75							2,6	2,61
1	–	2,37	2,7	2,67	2,4	2,46	2,6	2,64
1,5	2,3	2,61	2,4	2,46	2,2	2,40		
2	2,3	2,64	2,2	2,43	2,0	2,34		
2,5	2,7	2,64	2,1	2,34	2,0	2,28		
3	2,7	2,67	2,0	2,22	2,0	2,22		

* за даними МКХР [19]; ** за даними низькотемпературної порометрії.

для вихідного матеріалу $D_s^* = 2,6$; $D_s^{**} = 2,55$.

Таблиця 4.

Питома поверхня модифікованих ПВМ згідно методу МКХР [19] і БЕТ

$\tau_{\text{мод}}, \text{год}$	$t_{\text{мод}} = 300^\circ\text{C}$			$t_{\text{мод}} = 400^\circ\text{C}$			$t_{\text{мод}} = 500^\circ\text{C}$			$t_{\text{мод}} = 600^\circ\text{C}$		
	$S_{\text{МКХР}}$	$S_{\text{БЕТ}}$	k	$S_{\text{МКХР}}$	$S_{\text{БЕТ}}$	k	$S_{\text{МКХР}}$	$S_{\text{БЕТ}}$	k	$S_{\text{МКХР}}$	$S_{\text{БЕТ}}$	k
0,25										777	465	60
0,5	785	361	46	634	433	68	665	526	79	788	497	63
0,75										853	464	54
1	729	443	61	657	513	78	774	623	80	847	457	54
1,5	805	434	54	694	542	78	767	616	80			
2	773	439	57	734	573	78	806	653	81			
2,5	755	451	60	832	614	79	915	586	64			
3	768	450	59	795	652	82	912	479	53			

питома площа поверхні виражена в $\text{м}^2/\text{г}$;

k – у відсотках (для вихідного матеріалу $k = 73 \%$).

причиною зменшення параметра k , ймовірно, є ущільнення структури ПВМ. Це, в свою чергу, призводить не тільки до збільшення мікропористості, але і до формування ультрамікропор та закриття частини відкритих пор.

Таким чином, регулюючи температуру і час модифікації вихідного матеріалу, можна отримати ПВМ з контрольованою пористою структурою і фрактальною розмірністю, що є ефективним інструментом при синтезі матеріалів, які володіють наперед заданими властивостями.

Висновки

Показано можливості застосування методу низькотемпературної порометрії для дослідження фрактальної будови ПВМ, отриманих за різних умов термічної модифікації. За температур модифікації 300 і 600°C поверхнева фрактальна розмірність ПВМ є більшою, ніж для вихідного матеріалу, за рахунок збільшення частки питомої поверхні мікропор відносно загальної питомої поверхні пор. При 400 і 500°C та збільшенні тривалості модифікації

відбувається перерозподіл між мікро- і мезопорами в напрямку зростання кількості мезопор, що призводить до формування майже гладкої поверхні матеріалів із поверхневою фрактальною розмірністю близькою до 2. Проведено порівняльний аналіз між даними низькотемпературної порометрії та малокутового розсіяння X-променів, який свідчить про кореляцію у зміні величини D_s .

Мандзюк В.І. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки;

Лісовський Р.П. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри медичної інформатики, медичної і біологічної фізики;

Кулик Ю.О. – кандидат фізико-математичних наук провідний інженер кафедри фізики металів;

Рачій Б.І. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри матеріалознавства і новітніх технологій;

Соломовський Р.В. – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки.

- [1] Z. Guan, Z. Guan, Z. Li, J. Liu, K. Yu, *Characterization and preparation of nanoporous carbon derived from hemp stems as anode for lithium-ion batteries*, *Nanoscale Research Letters*, 14, 338 (2019); <https://doi.org/10.1186/s11671-019-3161-1>.
- [2] Y. Dou, X. Liu, K. Yu, X. Wang, W. Liu, J. Liang, C. Liang, *Biomass porous carbon derived from jute fiber as anode materials for lithium-ion batteries*, *Diamond and Related Materials*, 98, 107514 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.107514>.
- [3] V.I. Mandzyuk, V.A. Povazhnyi, B.I. Rachiy, *Anthracite-derived porous carbon as electrode material of lithium power sources*, *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 10(4), 04033 (2018); [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(4\).04033](https://doi.org/10.21272/jnep.10(4).04033).
- [4] D.S. Priya, L.J. Kennedy, G.T. Anand, *Emerging trends in biomass-derived porous carbon materials for energy storage application: A critical review*, *Materials Today Sustainability*, 21, 100320 (2023); <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100320>.
- [5] Z. Pan, S. Yu, L. Wang, C. Li, F. Meng, N. Wang, S. Zhou, Y. X. Z. Wang, Y. Wu, X. Liu, B. Fang, Y. Zhang, *Recent advances in porous carbon materials as electrodes for supercapacitors*, *Nanomaterials*, 13(11), 1744 (2023); <https://doi.org/10.3390/nano13111744>.
- [6] A.I. Kachmar, V.M. Boichuk, I.M. Budzulyak, V.O. Kotsyubynsky, B.I. Rachiy, R.P. Lisovskiy, *Effect of synthesis conditions on the morphological and electrochemical properties of nitrogen-doped porous carbon materials, Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 27(9), 669 (2019); <https://doi.org/10.1080/1536383X.2019.1618840>.
- [7] J. Zhou, A. Luo, Y. Zhao, *Preparation and characterisation of activated carbon from waste tea by physical activation using steam*, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68(12), 1269 (2018); <https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1460282>.
- [8] M. Härmas, T. Thomberg, H. Kurig, T. Romann, A. Jänes, E. Lust, *Microporous mesoporous carbons for energy storage synthesized by activation of carbonaceous material by zinc chloride, potassium hydroxide or mixture of them*, *Journal of Power Sources*, 326, 624 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.038>.
- [9] Yu. Starchuk, N. Ivanichok, I. Budzulyak, S.-V. Sklepova, O. Popovych, P. Kolkovskiy, B. Rachiy, *Electrochemical properties of nanoporous carbon material subjected to multiple chemical activation*, *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 30(9), 936 (2022); <https://doi.org/10.1080/1536383X.2022.2043285>.
- [10] G. Zhou, J. Yin, Z. Sun, X. Gao, F. Zhu, P. Zhao, R. Lia, J. Xu, *An ultrasonic-assisted synthesis of rice-straw-based porous carbon with high performance symmetric supercapacitors*, *RSC Advances*, 10(6), 3246 (2020); <https://doi.org/10.1039/c9ra08537h>.
- [11] H. Hu, Q. Li, L. Li, X. Teng, Z. Feng, Y. Zhang, M. Wu, J. Qiu, *Laser Irradiation of Electrode Materials for Energy Storage and Conversion*, *Matter*, 3(1), 95 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.05.001>.
- [12] W. Cha, S. Kim, P. Selvarajan, J.M. Lee, J.M. Davidraj, S. Joseph, K. Ramadass, I.Y. Kim, A. Vinu, *Nanoporous carbon oxynitride and its enhanced lithium-ion storage performance*, *Nano Energy*, 82, 105733 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105733>.

- [13] V.I. Mandzyuk, I.F. Myronyuk, V.M. Sachko, I.M. Mykityn, *Template synthesis of mesoporous carbon materials for electrochemical capacitors*, Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 56(1), 93 (2020); <https://doi.org/10.3103/S1068375520010123>.
- [14] L. Xie, Z. Jin, Z. Dai, Y. Chang, X. Jiang, H. Wang. *Porous carbons synthesized by templating approach from fluid precursors and their applications in environment and energy storage: A review*, Carbon, 170, 100 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.07.034>.
- [15] V.I. Mandzyuk, R.P. Lisovskiy, *Fractal structure of nanoporous carbon obtained by hydrothermal carbonization of plant raw materials*, Journal of Nano- and Electronic Physics, 14(5), 05027 (2022); [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(5\).05027](https://doi.org/10.21272/jnep.14(5).05027).
- [16] S.J. Gregg, K.S.W. Sing, Adsorption, surface area and porosity (Academic, London, 1982).
- [17] P. Pfeifer, K.-Y. Liu, *Multilayer adsorption as a tool to investigate the fractal nature of porous adsorbents*, Studies in Surface Science and Catalysis, 104, 625 (1997); [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(97\)80075-4](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(97)80075-4).
- [18] I.M.K. Ismail, P. Pfeifer, *Fractal analysis and surface roughness of nonporous carbon fibers and carbon black*, Langmuir, 10(5), 1532 (1994); <https://doi.org/10.1021/la00017a035>.
- [19] B.K. Ostafiychuk, V.I. Mandzyuk, Yu.O. Kulyk, N.I. Nagirna, *SAXS investigation of nanoporous structure of thermal-modified carbon material*, Nanoscale Research Letters, 9(1), 160 (2014); <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-160>.

V.I. Mandzyuk¹, R.P. Lisovskiy², Yu.O. Kulyk³, B.I. Rachiy¹, R.V. Solomovskiy¹

The effect of thermal modification of turbostratic carbon on its fractal structure

¹Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, volodymyr.mandzyuk@pnu.edu.ua

²Ivano-Frankivsk National Medical University, Ivano-Frankivsk, Ukraine,

³Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

Fractal structure of porous carbon materials (PCMs) obtained by thermal modification under different regimes was investigated using the method of low-temperature porometry. It was set that at modification temperatures of 300 and 600°C, materials with a developed microporous structure are formed, the surface fractal dimension of which is 2.64. When the modification temperatures are 400 and 500°C, the value of the fractal dimension of the surface decreases to a value of 2.22 with an increase in the duration of modification, which indicates the formation of an almost smooth surface as a result of the intensive removal of carbon atoms from the surface layers and a decrease in the number of micropores due to their transition into mesopores.

Keywords: porous carbon material, thermal modification, low-temperature porometry, specific surface area, surface fractal dimension.