

УДК 620.22:661.666-0.37

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-09>

**Скачков Віктор Олексійович**, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4447-4641

**Карпенко Ганна Володимирівна**, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3504-0283

**Румянцев Володислав Ростиславович**, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3182-2536

**Куріс Юрій Володимирович**, провідний науковий співробітник, доктор технічних наук, Інститут технічної теплофізики НАНУ, м. Київ. ORCID: 0000-0001-7169-9187

**Мосейко Юрій Вікторович**, доцент, кандидат педагогічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-4675-5221

**Мовчан Володимир Леонідович**, студент, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ СУСПЕНЗІЇ ПІД ЧАС ОДЕРЖАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИТІВ З НИЗЬКОЮ ЩІЛЬНІСТЮ

Виконано дослідження процесу осадження багатокомпонентної суспензії за одержанням вуглецевих композитів з низькою щільністю. Розроблено математичну модель, використання якої дає змогу обчислити технологічні параметри одержання осаду заданої щільності. Вивчено вплив ефективного опору фільтру та товщини шару осаду на швидкість витікання суспензії. Визначено залежність часу витікання суспензії від значень залишкового та гідравлічного опору рідини. Виявлено розподіл щільності за висотою осаду заготовки, а також змінювання її маси під час сушіння.

Ключові слова: вуглецеві композити, осадження з водяних суспензій, математична модель, формування осаду часточок, низька щільність

*Вступ.* У промисловості виробляють значну кількість композиційних матеріалів, що складаються з вуглецевих волокон різного типу та вуглецевої матриці, властивості яких варіюють у широких межах [1-5].

Високотемпературні матеріали з низькою щільністю мають особливе значення для сучасної техніки, оскільки характеризуються високим рівнем експлуатаційних параметрів, у тому числі низькі щільність і теплопровідність, що дозволяє забезпечувати можливість їх використання за високої температури.

*Аналіз досягнень.* Формування вуглецевих композитів з низькою щільністю методом осадження з водяної суспензії є найменш поширеним і недостатньо дослідженим порівняно з іншими методами одержання зазначеного класу матеріалів. Процес одержання зазначених вуглецевих композитів методом осадження суспензії передбачає застосування технологічної схеми [6-9], що містить:

- приготування вуглецевих волокон на основі віскози шляхом карбонізації віскозних волокон і подрібнення вуглецевих волокон;
- приготування порошку фенолоформальдегідної смоли;
- приготування порошку форполімеру й органічних пороутворювачів;
- приготування водяної суспензії;
- осадження суспензії на фільтр і сушіння одержаної заготовки;
- виконання високотемпературної обробки (карбонізації);
- поверхневе зміцнення (за необхідності).

Однією з найбільш відповідальних операцій зазначеної технологічної схеми є процес осадження багатокомпонентної суспензії, який супроводжується явищами седимента-

ції її компонентів, змінюванням ефективного опору витіканню рідкої фази як результату збільшення висоти осадку та формуванням його щільності.

*Постановка завдання.* Розробити математичну модель процесу осадження суспензії, використання якої дає змогу із високою точністю обчислювати параметри процесу з формуванням осадку заданої щільності під час виготовлення вуглецевих композитів з низькою щільністю.

*Основна частина досліджень.* Для виконання оцінки впливу значення залишкового тиску, об'ємної витрати води, ефективного опору фільтру, а також опору шару спакованих часточок, що зростає, у процесі одержання зазначених вуглецевих композитів виконують розробку математичної моделі, що враховує концентрацію кожного з компонентів водної суспензії, а також швидкість осадження кожної фракції.

Математичну модель процесу формування осаду під час осадження з урахуванням збільшення його товщини подають у вигляді системи двох кінетичних рівнянь:

$$\frac{dQ}{S \cdot d\tau} = \frac{P_h + (Q/S) \cdot \rho}{R_\phi + k \cdot h}, \quad (1)$$

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{dQ}{S d\tau} \cdot \frac{C}{C_n} + \sum_{i=1}^N \frac{V_i \cdot C_i}{C_n^i} \quad (2)$$

де  $Q$  – об'ємна витрата рідини, м<sup>3</sup>;  $S$  – площа фільтру, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – тривалість процесу осадження, с;  $P_h$  – залишковий тиск вакуумування, кг/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – щільність рідини, що витікає, кг/м<sup>3</sup>;  $R_\phi$  – ефективний опір фільтру, кг·с/м<sup>3</sup>;  $k$  – ефективний коефіцієнт об'ємного опору шару спакованих часточок, кг·с/м<sup>4</sup>;  $h$  – висота шару спакованих часточок, м;  $C$  – загальна концентрація всіх часточок у рідині, кг/м<sup>3</sup>;  $C_n$  – концентрація спакованих часточок, кг/м<sup>3</sup>;  $V_i$  – швидкість осадження  $i$ -ої фракції під час седиментації, м/с;  $C_i$  – концентрація часточок  $i$ -тої фракції у рідині, кг/м<sup>3</sup>;  $C_n^i$  – концентрація спакованих часточок  $i$ -тої фракції, кг/м<sup>3</sup>.

Рівняння (1) задає швидкість витікання рідкої фази суспензії, рівняння (2) – швидкість зростання шару спакованих часточок [10].

Для визначення ефективного опору фільтру з висотою шару спакованих часточок, що зростає, виконано спеціальні експерименти за наступною схемою. Заданий об'єм суспензії осаджували на фільтрі з формуванням шару спакованих часточок заданої товщини  $h$ . Через сформований шар пропускали чисту воду з різним гідростатичним натиском і залишковим тиском вакуумування. Визначали тривалість витікання заданого об'єму води від фіксованого початкового об'єму  $V_0$ . Дослідні значення швидкості витікання суспензії залежно від товщини шару та ефективного опору фільтру подано у табл. 1.

Виконують інтегрування рівняння (1) за умови постійності товщини осадженого шару  $h$ :

$$R_\phi + k \cdot h = \frac{\tau}{\ln\left(\frac{P_h \cdot S + Q_0 \cdot Q}{P_h \cdot S + Q_0}\right)}. \quad (3)$$

Використовуючи дані, що наведено у табл. 1, а також рівняння (3), маємо:  $R_\phi = 2700$  кг·с/м<sup>3</sup>;  $k = 2,8 \cdot 10^4$  кг·с/м<sup>3</sup>.

Аналіз одержаних результатів дає змогу встановити, що ефективний опір фільтру з осадом зростає із збільшенням товщини осадженого шару, а швидкість витікання рідини знижується із збільшенням товщини осаду.

Таблиця 1 – Дослідні значення ефективного опору осадженого шару різної товщини

Товщина осадженого шару, мм	Значення залишкового тиску, кг/м <sup>2</sup>	Початковий об'єм, мл	Об'єм, що витікає, мл	Тривалість витікання, с	Ефективний опір фільтру, кг·с/м <sup>3</sup>
24	0,60	400	200	70	3674
24	0,60	800	200	29	3174
50	0,86	1100	100	24	3759
50	0,80	400	100	36	5021
50	0,86	2500	200	39	3123
71	0,50	400	100	72	6371
71	0,84	1600	200	102	7931
240	0,62	2500	200	176	10506
240	0,88	900	200	137	10792
240	0,80	1600	200	114	8606
240	0,80	1200	300	196	9571

Виконуючи інтегрування рівняння (2), а також здійснюючи підставлення отриманої формули до рівняння (1), можна записати

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{P_h \cdot S + Q \cdot \rho}{\left( R + \frac{k \cdot C \cdot Q_0}{S \cdot C_n} \right) + k \cdot \left[ \frac{C \cdot Q}{S \cdot C_n} + \left( \sum_{i=1}^N \frac{V_i \cdot C_i}{C_n^i} \right) \cdot \tau \right]}, \quad (4)$$

де  $Q_0$  – початковий об'єм суспензії, м<sup>3</sup>.

Після інтегрування рівняння (4) отримують трансцендентне рівняння, що має вигляд:

$$\left( \frac{V \cdot U_n}{U \cdot V_n} \right)^A \cdot \left( \frac{(V/U) - R_2}{(V_n/U_n) - R_2} \right)^B = \frac{U}{U_n}, \quad (5)$$

$$\text{де } V = Q - \frac{P_h \cdot S}{\rho}; \quad V_n = Q_0 - \frac{P_h \cdot S}{\rho}; \quad U = \tau - \frac{R_\phi + \frac{k \cdot C \cdot Q}{S \cdot C_n}}{\sum_{i=1}^N \frac{V_i \cdot C_i}{C_n^i}}; \quad U_n = - \frac{R_\phi + \frac{k \cdot C \cdot Q_0}{S \cdot C_n}}{\sum_{i=1}^N \frac{V_i \cdot C_i}{C_n^i}};$$

$$R_2 = \frac{\left( \rho - \sum_{i=1}^N \frac{V_i \cdot C_i}{C_n^i} \right) \cdot S \cdot C_n}{k \cdot C}; \quad A = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{V_i \cdot C_i}{C_n^i}}{R_2}; \quad B = \frac{k \cdot C}{S \cdot C_n} - A.$$

З використанням рівняння (5) можна виконати обчислення витрати рідини  $Q$  через фільтр залежно від тривалості процесу осадження  $\tau$  з урахуванням залишкового тиску вакуумування  $R_\phi$  та висоти зростаючого шару спакованих часточок  $h$ .

Чисельне вирішення рівняння (4) відносно часу процесу осадження виконували на ПЕВМ з використанням програми на алгоритмічній мові «TURBO PASCAL».

Результати обчислень щодо визначення залежності тривалості витікання суспензії від значень залишкового тиску та гідростатичного натиску наведено у табл. 2.

Із включенням вакуумного насоса з'являється різниця тисків над системою фільтрів і під нею. Над системою фільтрів діє сила гідростатичного натиску, яку створено стов-

пом суспензії, під фільтром встановлюється залишковий тиск. Різниця тисків є рушійною силою процесу осадження часточок суспензії. Швидкість витікання рідини накладається на швидкість осадження часточок, збільшуючи швидкість зростання шару спакованих часточок, які знаходяться у суспензії. Безпосередньо на системі фільтрів і в зоні гранично високих концентрацій часточок відбувається процеси формування структури заготовки.

Таблиця 2 – Залежність тривалості витікання рідкої фази від значень залишкового тиску та гідростатичного натиску

Залишковий тиск рідини, МПа	Тривалість витікання, с		
	гідростатичний натиск, МПа		
	0,001	0,002	0,005
0	45	76	132
0,2	63	102	171
0,4	69	131	200
0,6	142	201	274
0,8	363	419	481
1,0	432	521	590

Змінювання щільності за висотою висушеної заготовки зумовлена двома чинниками: швидкістю витікання рідини та процесом седиментації. Нижні, щільніші шари заготовки формуються процесом витікання рідини з урахуванням часткової седиментації часточок. Середні шари заготовки утворюються за рахунок більшого впливу процесу седиментації та витікання рідини. Для цих шарів характерними є часточки більших фракцій, гранична щільність упаковки яких є низькою. Верхні шари осаду формуються в основному за рахунок витікання рідини. Часточки, що утворюють верхні шари, характеризуються наявністю найбільш дрібних фракцій, які є частками фенолоформальдегідної смоли. Як наслідок, щільність верхніх шарів осаду є значно вищою, ніж щільність середнього та нижнього його шарів.

Окрім того, виконували експерименти щодо вивчення процесу сушіння осадженої заготовки. Під час сушіння значення залишкового тиску складає  $0,1 \text{ кг/м}^2$ . Результати досліджень наведено у табл. 3.

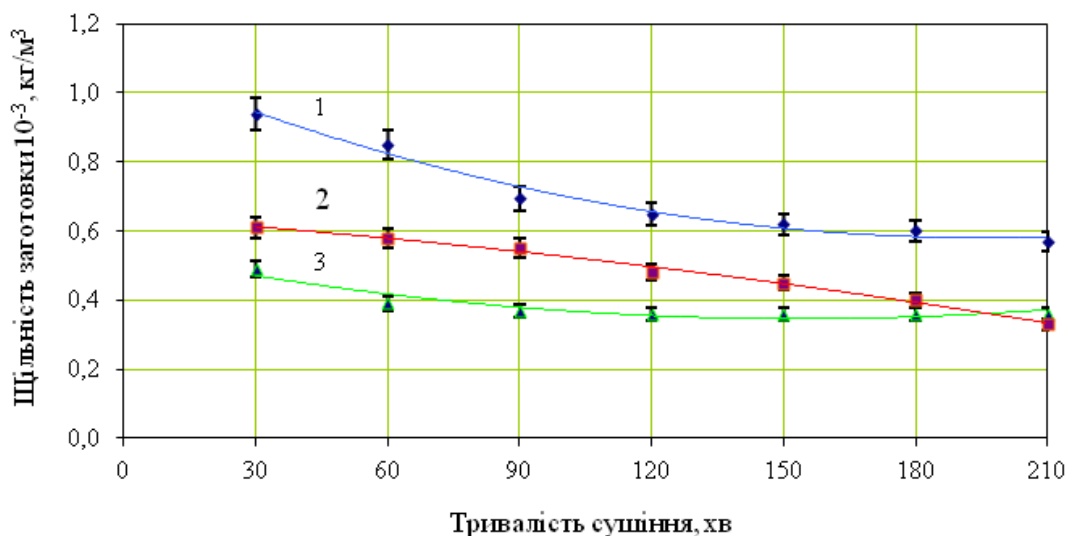
Таблиця 3 – Змінювання маси заготовки під час сушіння, %

Температура, К	Тривалість сушіння, хв.						
	30	60	90	120	150	180	210
353	3	6	15	18	24	27	33
373	5	8	14	19	26	29	36
393	6	10	15	30	45	53	58

Середній шар формується за рахунок великих фракцій порошкоподібних компонентів суспензії. Упаковка таких часточок визначає щільність цього шару заготовки в інтервалі від  $0,6 \cdot 10^3$  до  $0,36 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Нижній шар осаду формується з рівномірних за гранулометричним складом часточок, внаслідок чого щільність нижньої частини заготовки під час сушіння складає в діапазоні від  $0,48 \cdot 10^3$  до  $0,36 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Розподіл щільності за висотою висушеної заготовки подано у табл. 4, нерівномірність щільності складає 25%. Одночасно, для нижньої частини заготовки щільність становить  $0,35 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , її середньої частини –  $0,26 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , верхньої частини –  $0,33 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .



1, 2, 3 - верхня, середня та нижня частини заготовки відповідно  
Рисунок 1 – Змінювання щільності заготовки під час сушіння за температури 393 К

Таблиця 4 – Змінювання щільності за висотою висушеної заготовки

Висота висушеної заготовки, мм	0	40	80	120	160	200	240
Щільність висушеної заготовки, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>	0,350	0,282	0,261	0,268	0,269	0,312	0,328

#### Висновки.

1. Розроблено математичну модель процесу осадження суспензії, що враховує швидкість витікання рідини та зростання шару спакованих часточок. Розрахунковим шляхом визначено значення залишкового тиску та гідростатичного натиску, які забезпечують необхідний розподіл щільності за висотою осадженої заготовки із заданим вмістом компонентів.

2. Вивчено параметри технологічного режиму сушіння осадженої заготовки: температура сушіння – 393 К, тривалість витримки за максимальної температури – 3 год.

3. Визначено розподіл щільності за висотою висушеної заготовки, що складає у нижній частині від  $0,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> до  $0,35 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, у середній частині від  $0,26 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> до  $0,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> та у верхній частині від  $0,25 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> до  $0,32 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Зазначений розподіл щільності дає змогу забезпечити рівномірний розподіл щільності за об'ємом заготовки з розсіюванням  $\pm 0,01 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

#### Бібліографічний перелік

1. Бутырин Г. М. Высокопористые углеродные материалы. Москва : Химия, 1976. 192 с.
2. Углеродные волокна и углекомпозиаты. Пер. с англ. / Под ред. Э. Фитцера. Москва : Мир, 1988. 336 с.
3. Фиалков А. С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. Москва : Аспект Пресс, 1997. 714 с.
4. Бушуев Ю. Г., Персин М. И., Соколов В. А. Углерод-углеродные композиционные материалы. Справочник. Москва : Металлургия, 1994. 128 с. ISBN 5-229-01167-X.
5. Мелешко А. И., Половников С. П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. Москва : Сайнс-пресс, 2007. 194 с. ISBN 5-88070-119-0.
6. Скачков В. А., Кудиевский С.С., Карпенко А. В., Шаповалов Р. А. Формирование заготовок углерод-углеродных композиционных материалов из водных суспензий. *Металлургия. Труды ЗГИА*. Запорожье : РИО ЗГИА, 1999. Вып. 2. С. 82-86.

7. Карпенко Г. В. Одержання низькощільних карбонізованих матеріалів *Металлургия. Труды ЗГИА*. Запорожье : РИО ЗГИА, 2006. Вып. 13. С. 139-141.
8. Карпенко А. В. Научные основы получения низкоплотных теплоизоляционных материалов методом разлива из водных суспензий. *Вопросы химии и химической технологии*. 2006. Вып. 8. С. 138-142.
9. Карпенко А. В., Скачков В. А., Червоний И. Ф. Получение низкоплотных углеродных карбонизованных материалов. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. 1/5 (61). С. 48-51.
10. Нелинейные задачи динамики вязкой жидкости / Под ред. И. Е. Березина. Свердловск : УрО-АН СССР, 1990. 156 с.

### References

1. Butyrin G. M. *Vysokoporistye uglerodnye materialy*. Moskva : Khimiya, 1976. 192 p.
2. *Uglerodnye volokna i uglekompozity*. Per. s ang. / Pod red. E. Fishera. Moskva : Mir, 1988. 336 p.
3. Fialkov A. S. *Uglerod, mezhshloevye sordineniya i kompozity na ego osnove* Moskva : Aspekt Press, 1997. 714 p.
4. Bushuev Yu. G., Persin M. I., Sokolov V. A. *Uglerod-uglrodnye kompozitsionnye materialy*. Spravochnik. Moskva : Metallurgiya, 1994. 128 p. ISBN 5-229-01167-X.
5. Meleshko A. I., Polovnikov S. P. *Uglerod, uglerodnye volokna, uglerodnye kompozity*. Moskva : Sayns-press, 2007. 194 p. ISBN 5-88070-119-0.
6. Skachkov V. A., Kudievskiy S. S., Karpenko A. V., Shapovalov R. A. *Formirovanie zagotovok uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov iz vodnykh suspenziy*. Metallurgiya. Trudy ZGIA. Zaporozhe : RIO ZGIA, 1999. vol. 2. pp. 82-86.
7. Karpenko H. V. *Oderzhannya nyzkoshchilnykh karbonizovanykh materialiv*. Metallurgiya Trudy ZGIA. Zaporozhe : RIO ZGIA, 2006. vol. 13. pp. 139-141.
8. Karpenko A. V. *Nauchnye osnovy polucheniya nizkoplotnykh teploizolyatsionnykh materialov metodom razliva iz vodnykh suspenziy*. Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologiy. 2006. vol. 8. pp. 138-142.
9. Karpenko A. V., Skachkov V. A., Chervony I. F. *Poluchenie nizkoplotnykh uglerodnykh karbonizovanykh materialov*. Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. 2013. no. 1/5 (61). pp. 48-51.
10. *Nelineynye zadachi dinamiki vyazkoy zhidkosti* / Pod red. I. E. Berezina. Sverdlovsk : UrO AN SSSR, 1990. 156 p.

**Skachkov Viktor**, professor, doctor of technical sciences, Zaporozhe national university.

**Karpenko Hanna**, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

**Rumyantsev Vladyslav**, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

**Kuris Yurii**, chief researcher, doctor of technical sciences, institute of engineering theplophysic NANU, Kyiv.

**Mosejko Yurii**, associate professor, candidate of pedagogic sciences, Zaporozhe national university

**Movchan Vladimir**, student, National university of ship-building, c. Nikolaev.

### RESEARCHES OF PROCESS DEPOSITION FOR MULTICOMPONENT SUSPENSION AT PRODUCTION OF LOW-COMPACTED CARBON COMPOSITES

One of methods for production of carbon composition materials is a casting of aquatic suspensions, which foresees preparation of aquatic suspension of the set classification and concentration composition, forming of carboplastic billet by the aquatic suspension deposition on filters, drying of the bullet with subsequent realization of high temperature treatment. The deposition of aquatic suspension is accompanied by the phenomena of sedimentation of its components, change of effective resistance to outflow of rare phase as a result of increase of sediment height

and forming of its density. Calculation and experimental researches of multicomponent aquatic suspension deposition at the production of low-compacted carbon composites is performed. The mathematical model of forming of sediment taking into account the increase of its thickness is worked out which is presented as a system of two kinetic equations. The first equation sets speed of outflow of liquid phase of suspension, second equation - speed of growth for layer of the wrapped particles. By its transformation transcendent equation for determination of suspension outflow duration of from filters is got. The numeral decision of the indicated equation was performed on computer with the use of algorithmic language of «Turbo Pascal». Influence of effective resistance of filter and thickness sediment layer of is studied on speed of suspension outflow. Dependence of time of suspension outflow on the sizes of remaining and hydraulic resistance of liquid is certain. Distribution of closeness is educed on the height of the poured off purveyance, and also changes of billet mass at drying.

Стаття надійшла: 17.09.2020 р.