

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.5.1>

УДК 537.525

АНДРІЄНКО О. В., ЦИБУЛЬСКИЙ Л. Ю.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Україна

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОТІКАННЯ ГАЗУ ЧЕРЕЗ ПЕРФОРОВАНУ ТРУБКУ В КООКСІАЛЬНІЙ РОЗРЯДНІЙ СИСТЕМІ

**Мета:** Визначення впливу конструктивних параметрів газорозрядної системи на основі перфорованої трубки на розподіл тиску азоту між електродами, а також моделювання фізико-топологічних характеристик цієї системи для покращення її ефективності.

**Методика:** Моделювання газорозрядного процесу здійснено з використанням чисельних методів розрахунку тиску і швидкості газу в коаксіальній розрядній системі. Основою методики є рівняння Нав'є-Стокса для однофазного потоку азоту через перфоровану трубку, враховуючи різні режими протікання (ламінальний і турбулентний), а також варіації температури, в'язкості та густини газу. Число Рейнольдса застосовується для класифікації режимів потоку.

**Результати:** Моделювання показало, що розподіл газу в розрядній системі залежить від параметрів трубки і розташування отворів в аноді. Газ протікає нерівномірно через отвори, що спричиняє нерівномірність горіння розряду по осі системи. Для покращення рівномірності розподілу газу рекомендується застосовувати більш складні конструкції системи.

**Наукова новизна:** Вперше проведено моделювання газорозрядної системи з перфорованою трубкою з використанням фізико-топологічного підходу для дослідження впливу конструктивних параметрів на розподіл тиску газу, що дозволило виявити критичні аспекти, які впливають на рівномірність потоку і, відповідно, стабільність розряду.

**Практична значимість:** Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкцій газорозрядних систем у промислових і наукових установках, зокрема для забезпечення стабільності і рівномірності розряду в коаксіальних системах. Це дозволить підвищити ефективність роботи таких установок.

**Ключові слова:** газорозрядна система; перфорована трубка; коаксіальна система; моделювання; розподіл тиску; азот; рівняння Нав'є-Стокса.

**Вступ.** Газорозрядні системи знаходять широке застосування в наукових дослідженнях і промислових технологіях, зокрема в галузях, що використовують вакуумно-плазмові процеси, таких як мікроелектроніка, медицина, а також в промислових установках для очищення газів та створення джерел світла [14]. Азотування поверхонь є одним із ключових процесів у сучасному матеріалознавстві, яке використовується для зміцнення поверхневих шарів металів і сплавів та їх захисту від корозії [1].

В умовах зростаючої потреби у високоміцних та довговічних матеріалах важливим завданням є підвищення ефективності процесу азотування, що дозволить покращити якість оброблених поверхонь, знизити витрати енергії та збільшити продуктивність [3, 12]. Основна проблема традиційних термохімічних методів обробки – утворення сполук хрому, що знижує стійкість до корозії [6]. Одним із перспективних підходів до оптимізації цього процесу є використання газорозрядних систем для азотування [11], де контроль за розподілом газу відіграє ключову роль [19]. Точне керування розподілом азоту в зоні обробки дозволяє підвищити ефективність дифузії атомів азоту в матеріал, що, у свою чергу, покращує якість азотованого шару.

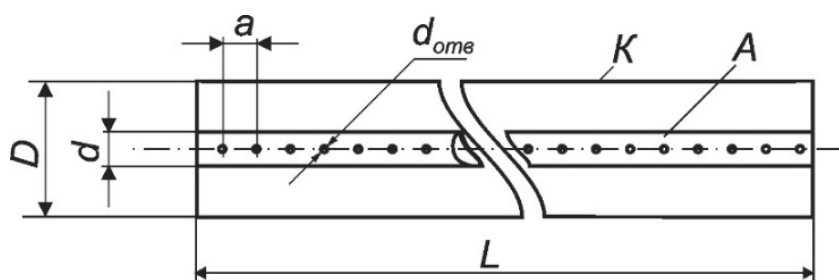
Дослідження конструктивних параметрів газорозрядної системи шляхом моделювання має низку переваг порівняно з експериментальними методами, зокрема завдяки можливості точного контролю та регулювання параметрів системи, зменшенню витрат і ризиків, а також підвищенню ефективності самого процесу дослідження [4].

Моделювання газорозрядних процесів вимагає рішення декількох пов'язаних задач з метою з'ясування розподілу ряду фізичних параметрів: тиску газу в розрядній системі, напруженості електричного та магнітних полів, іонів та електронів в міжелектродному просторі, струму на електродах, імплантованих атомів тощо. Формулювання кожної задачі включає математичну модель фізичного процесу, початкові та граничні умови. З огляду на чисельність задач та складність конструкції, можна стверджувати, що моделювання газорозрядних систем доволі складна задача. Початкові та граничні умови залежать від конструкції системи, типу та тиску газу, тому їх з'ясування є окремою науковою задачею на кожному кроці моделювання. Аналітично перелічені задачі вирішити не вдається, тому для встановлення розподілів та інтегральних параметрів газорозрядних систем застосовують чисельні методи доволі розвинені в сучасних прикладних пакетах комп'ютерних програм.

У зв'язку з цим дослідження конструктивних параметрів газорозрядної системи, які впливають на розподіл тиску азоту, є необхідним для оптимізації процесу азотування та забезпечення рівномірності й стабільності впливу азоту на поверхню [16]. Розробка та впровадження ефективних методів моделювання газорозподілу в розрядних системах дозволить значно підвищити ефективність азотування і відповідати вимогам сучасного промислового виробництва.

**Матеріали та методи.** У цьому дослідженні моделювання протікання азоту через перфоровану трубку в коаксіальній розрядній системі здійснювалося з метою визначення впливу конструктивних параметрів на розподіл тиску між електродами. Основою для проведення розрахунків слугували рівняння Нав'є-Стокса, які описують поведінку однофазного потоку азоту. Для врахування різних режимів протікання газу були розглянуті ламінарний та турбулентний режими, що дозволило забезпечити точність і детальність моделювання.

Моделювання здійснювалося за допомогою чисельних методів, використовуючи сучасні програмні комплекси, які забезпечують високоточні обчислення гідродинамічних параметрів. Для класифікації режимів потоку застосовувалося число Рейнольдса, яке враховувало залежність динамічної в'язкості та густини газу від температури і тиску. Геометричні параметри моделі зображено на рисунку 1, а значення параметрів наведено в таблицях нижче для прикладів результатів розрахунків.



Легенда:

A – перфорована трубка – анод; K – трубка – катод; L – довжина катоду; D – діаметр катоду; d – діаметр аноду; a – відстань між отворами в аноді; d<sub>отв</sub> – діаметр отворів в аноді.

Рис. 1. Конструкція та геометричні параметри дослідної моделі

У отвір анодної трубки подається газоподібний азот з загальним тиском  $10^2 \div 10^3$  Па. З другого боку анодна трубка закрита і весь газ через бокові отвори в аноді потрапляє в циліндричний простір між анодом та катодом, і далі дифундує в отвір на протилежному кінці катодної трубки.

Фундаментальною характеристикою аналізу потоку газу (рідини) є число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}, \quad (1)$$

де  $\rho$  – густина газу ( $\text{кг/м}^3$ );  $U$  – швидкість протікання газу,  $L$  – характеристичний розмір,  $\mu$  – динамічна в'язкість ( $\text{Па}\cdot\text{с}$ ), яка для ньютонівської рідини залежить від термодинамічного стану, але не від поля швидкості. Всі гази можна вважати ньютонівськими.

Число Рейнольдса відображає співвідношення між інерційними і в'язкими силами. При низьких числах Рейнольдса домінують в'язкі сили, які мають тенденцію гасити всі збурення, що призводить до ламінарного потоку. При високих числах Рейнольдса демпфірування в системі дуже низьке, що дає невеликим збуренням можливість рости за рахунок нелінійних взаємодій. Якщо число Рейнольдса досить високе, поле потоку в кінцевому підсумку опиняється в хаотичному стані, званому турбулентністю.

Відзначимо, що число Рейнольдса може мати різні значення в залежності від масштабу довжини і діапазону швидкостей. Щоб мати можливість порівняти два числа Рейнольдса, вони повинні базуватися на шкалах еквівалентної довжини і швидкості.

Густина азоту при нормальних умовах ( $101,325$  кПа) становить  $1250,6$   $\text{г/м}^3$ , а при тисках  $10^2 \div 10^3$  Па становить  $1,25 \div 12,51$   $\text{г/м}^3$  відповідно. Характеристичним розміром можна вважати різницю між радіусами катоду та аноду –  $L = 1$  см =  $0,01$  м. Швидкість протікання газу регулюється під час експериментів і може становити від часток до одиниць метрів за секунду. Динамічна в'язкість азоту при нормальних умовах (температурі  $0^\circ\text{C}$ ) становить  $0,00001665$   $\text{Па}\cdot\text{с}$ .

При моделюванні необхідно враховувати залежність параметрів азоту від температури та тиску. В таблиці 1 [8] наведені дані про густину та динамічну в'язкість азоту в залежності від температури при атмосферному тиску. Видно що ці параметри сильно залежать від температури.

Таблиця 1

**Залежність щільності та динамічної в'язкості азоту від температури**

Температура, T	Густина, $\rho$	Динамічна в'язкість, $\mu$
K	$\text{кг/м}^3$	$(\text{Па}\cdot\text{с}) \cdot 10^{-6}$
300	1,1233	17,78
400	0,8425	22,1
500	0,6739	25,9
600	0,5615	29,3
700	0,4812	32,25

При протіканні газового розряду температура газу може змінюватись, до того ж в різних областях розрядного середовища можливі локальні відмінності параметрів від середніх значень.

З урахуванням наведених даних число Рейнольдса при протіканні азоту в системі електродів, яка наведена на рис. 1 при температурі  $300$  К складе:

$$R_e = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{1.1233 \cdot 1 \cdot 0.01}{17.78 \cdot 10^{-6}}, \quad (2)$$

При температурі  $600$  К –  $R_e = 190$ . При таких значеннях числа Рейнольдса ( $R_e < 2000$ ) режим протікання азоту буде інерційним. Такий режим протікання також називають ламінарним.

**Результати та обговорення.** На рис. 2 зображено розподіл швидкості газу в дослідній моделі коаксіальної розрядної системи при різних режимах взаємодії газу з поверхнею стінок: без ковзання (no slip) та з ковзанням (sliding).

Розрахунок проведено для ламінарного режиму протікання азоту, довжина електродів  $20$  см, діаметр катоду  $20$  мм, діаметр аноду  $6$  мм (внутрішній діаметр  $4$  мм). Отвори в анодній

трубці діаметром 1 мм розташовані на відстані 1 см. Перепад тиску між входом та виходом нема  $P_0=0$  Па. Швидкість газу на вході становить 100 м/с.

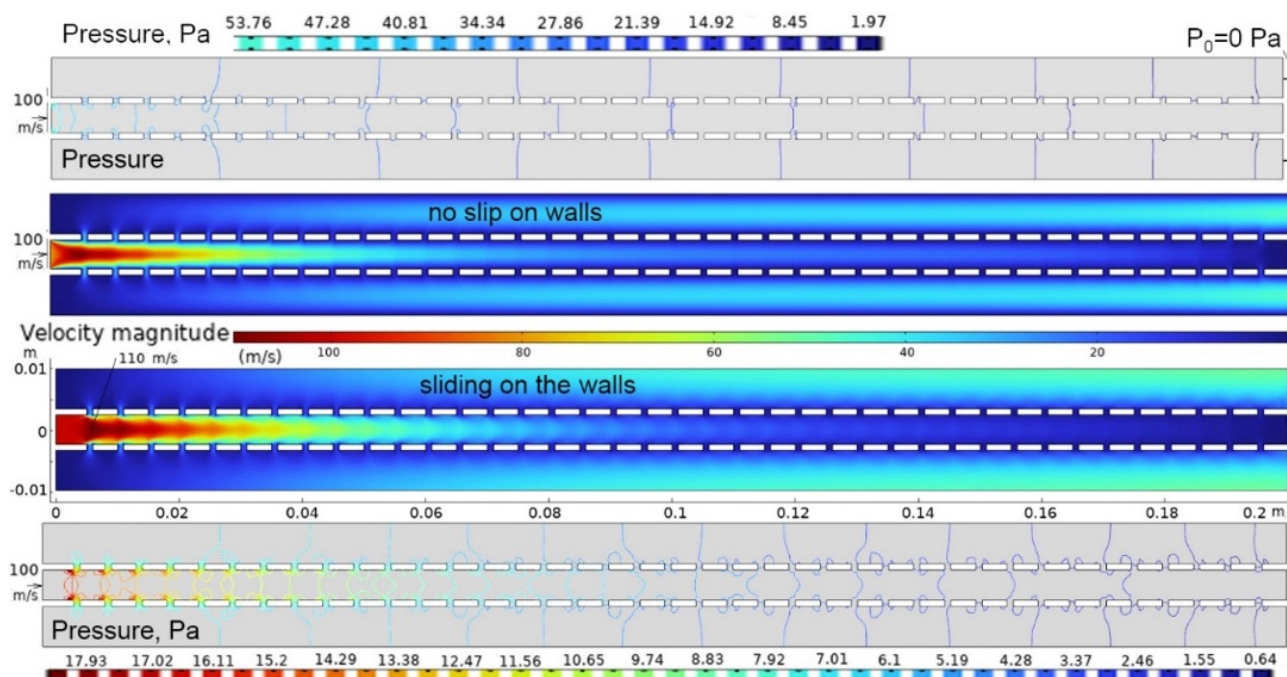


Рис. 2. Кольорові карти полів швидкості азоту та ізобари тиску в дослідній моделі коаксіальної розрядної системи при ковзанні (sliding) газу на поверхні стінок та без ковзання (no slip). Стрілками показано напрям газу на вході і виході

Поля швидкості азоту на рис. 3 наочно демонструють вплив стану поверхонь стінок розрядної системи на режими протікання газу. В залежності від стану поверхні (шорсткість, чистота) і матеріалу електродів виникає режим протікання газу проміжний між двома наведеними крайніми режимами, який визначає розподіл щільності газу в електродній системі. Густина газу має лінійну залежність від тиску, розподіл якого представлено на рис. 2 у вигляді ізобар.

Додатковий вплив на параметри розряду також можуть мати траєкторії руху ліній газу. Приклад розрахунку траєкторій руху газу наведено на рис. 3.

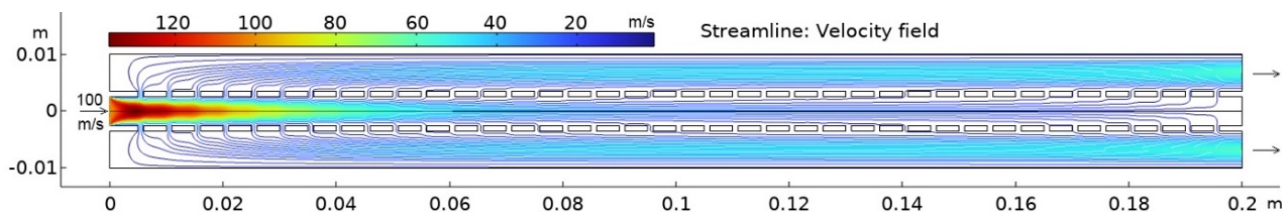


Рис. 3. Траєкторії та швидкість руху азоту в коаксіальній розрядній системі

При циліндричному аноді газ не рівномірно проходить через отвори, що призводить до різного стану газу в різних частинах розрядної системи і, як наслідок, до різного режиму горіння розряду.

Нерівномірність проходження газу наочно представлена на рис. 4, де наведено збільшений фрагмент траєкторій протікання газу в розрядній системі з катодом діаметром 12 мм.

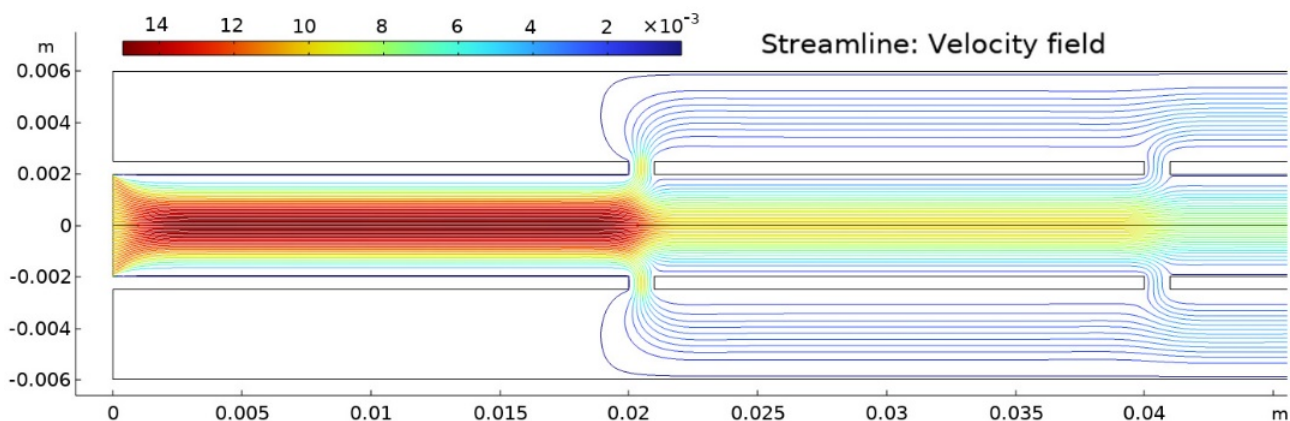


Рис. 4. Траєкторії та швидкість руху азоту в коаксіальній розрядній системі (збільшений фрагмент)

Густина ліній на рисунку корелює з кількістю газу, що проходить через отвори.

Для забезпечення рівномірності горіння розряду необхідно забезпечити рівномірні потоки газу через отвори. Для досягнення такого стану необхідно використовувати більш складну конструкцію розрядної системи.

**Висновки.** Проведені розрахунки показали, що розподіл тиску газу вздовж системи є нерівномірним, що пов'язано зі специфічною конструкцією трубки та розташуванням отворів в аноді. Така нерівномірність спричиняє нестабільність горіння розряду, що може негативно впливати на роботу системи.

Було виявлено, що для досягнення рівномірного потоку газу й стабільного горіння розряду важливо ретельно підбирати геометричні параметри системи, зокрема розмір і відстань між отворами в аноді, а також контролювати тиск і швидкість газу. При цьому за низьких значень числа Рейнольдса спостерігається ламінарний режим протікання азоту, що сприяє передбачуваним умовам роботи системи.

Моделювання з використанням чисельних методів довело свою ефективність у прогнозуванні поведінки газу в подібних системах. Результати дослідження можуть бути корисними для оптимізації конструкцій газорозрядних систем, що працюють в різних промислових і наукових середовищах. Для забезпечення стабільнішого та більш рівномірного розподілу газу пропонується використовувати складніші конструкції систем, що дозволить покращити їхню ефективність і надійність.

Для перспектив майбутніх досліджень можна зазначити, що подальше вдосконалення конструкцій газорозрядних систем із перфорованою трубкою має зосередитися на оптимізації розташування отворів та варіації геометричних параметрів для досягнення стабільнішого і рівномірного розподілу тиску. Це включає вивчення впливу матеріалу трубки та її діаметра на формування газового потоку та його взаємодію з електродами. Додатково, перспективним напрямом є дослідження ефектів різних газових сумішей та умов ковзання газу по стінках на стабільність розряду.

## References

1. Aghajani, H., Behrangi, S. (2017). Plasma Nitriding of Steels. Switzerland: Springer.
2. Aizawa, T., Wasa, K. (2017). Low temperature plasma nitriding of inner surfaces in stainless steel mini-/micro-pipes and nozzles. *Micromachines*, 8(5), 157. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi8050157>.

## Література

1. Aghajani H., Behrangi S. Plasma Nitriding of Steels. Switzerland: Springer, 2017.
2. Aizawa T., Wasa K. Low temperature plasma nitriding of inner surfaces in stainless steel mini-/micro-pipes and nozzles. *Micromachines*. 2017. No. 8(5). Art. 157. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi8050157>.

3. Bai, Z., Wu, X. (2024). Improving stress corrosion resistance and wear resistance of austenitic hot-stamping die steels via synergistic effects of shot peening and plasma nitriding. *Surf Coat Tech.*, 478: 130448. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130448>.
4. Berladir, K., Hovorun, T., Ivanov, V., Vukelic, D., Pavlenko, I. (2023). Diffusion Nitride Coatings for Heat-Resistant Steels. *Materials*, 16(21): 6877. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16216877>.
5. Bogaerts, A., Gijbels, R. (2003). Numerical modeling of gas discharge plasmas for various applications. *Vacuum*, 69: 37–52.
6. Borgioli, F. (2022). The “Expanded” Phases in the Low-Temperature Treated Stainless Steels: A Review. *Metals*, 12(2): 331. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12020331>.
7. Borgioli, F., Adachi, S., Lindner, T. (2024). Advances in Low-Temperature Nitriding and Carburizing of Stainless Steels and Metallic Materials: Formation and Properties. *Metals*, 14(10): 1179. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14101179>.
8. Poling, B. E., Prausnitz, J. M., O’Connell, J. P. (2001). Properties of gases and liquids. The McGraw-Hill Companies, Inc. DOI: 10.1036/0070116822.
9. Coulson, J. M., Richardson, J. F. (2002). Particle Technology and Separation Processes. *Chemical Engineering*, Vol. 2. Butterworth-Heinemann.
10. Farayibi, P. K., Hankel, J., van gen Hassend, F., Blüm, M., Weber, S., Röttger, A. (2023). Tribological characteristics of sintered martensitic stainless steels by nano-scratch and nanoindentation tests. *Wear.*, 512–513: 204547. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204547>.
11. Kuzmichev, A. I., Melnichenko, M. S., Shulaev, V. M. (2021). Secondary emission of atomic particles under bombardment of heavy d-metals by ions from nitrogen plasma. *Rus. Phys. Journ.*, 63(10): 1743–1749.
12. Phadke, P., Sturm, J. M., an de Kruijs, R. W., Bijkerk, F. (2020). Sputtering and nitridation of transition metal surfaces under low energy, steady state nitrogen ion bombardment. *Applied Surface Science*, 505: 144529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144529>.
13. Panton, R. L. (1996). Incompressible Flow. John Wiley & Sons.
3. Bai Z., Wu X. Improving stress corrosion resistance and wear resistance of austenitic hot-stamping die steels via synergistic effects of shot peening and plasma nitriding. *Surf Coat Tech.* 2024. Vol. 478. Art. 130448. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130448>.
4. Berladir K., Hovorun T., Ivanov V., Vukelic, D., Pavlenko I. Diffusion Nitride Coatings for Heat-Resistant Steels. *Materials*. 2023. Vol. 16, No. 21. Art. 6877. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16216877>.
5. Bogaerts A., Gijbels R. Numerical modeling of gas discharge plasmas for various applications. *Vacuum*. 2003. Vol. 69. P. 37–52.
6. Borgioli F. The “Expanded” Phases in the Low-Temperature Treated Stainless Steels: A Review. *Metals*. 2022. Vol. 12, No. 2. Art. 331. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12020331>.
7. Borgioli F., Adachi S., Lindner T. Advances in Low-Temperature Nitriding and Carburizing of Stainless Steels and Metallic Materials: Formation and Properties. *Metals*. 2024. Vol. 14, No. 10. Art. 1179. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14101179>.
8. Poling B. E., Prausnitz J. M., O’Connell J. P. Properties of gases and liquids. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2001. DOI: 10.1036/0070116822.
9. Coulson J. M., Richardson J. F. Particle Technology and Separation Processes. *Chemical Engineering*, Vol. 2. Butterworth-Heinemann.
10. Farayibi P. K., Hankel J., van gen Hassend F., Blüm M., Weber S., Röttger A. Tribological characteristics of sintered martensitic stainless steels by nano-scratch and nanoindentation tests. *Wear*. 2023. Vol. 512–513. Art. 204547. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204547>.
11. Kuzmichev A. I., Melnichenko M. S., Shulaev V. M. Secondary emission of atomic particles under bombardment of heavy d-metals by ions from nitrogen plasma. *Rus. Phys. Journ.* 2021. Vol. 63, No. 10. P. 1743–1749.
12. Phadke P., Sturm J. M., van de Kruijs R. W., Bijkerk F. Sputtering and nitridation of transition metal surfaces under low energy, steady state nitrogen ion bombardment. *Applied Surface Science*. 2020. Vol. 505. Art. 144529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144529>.
13. Panton R. L. Incompressible Flow. John Wiley & Sons, 1996.

14. Raizer, Yu. P. (1991). Gas Discharge Physics. Berlin: Springer-Verlag.
15. Scheuer, C. J., Cardoso, R. P., Mafra, M., Brunatto, M. S. F. (2021) Effects of the voltage and pressure on the carburizing of martensitic stainless steel in pulsed DC glow discharge. *Mater Res.*, 24(6). DOI: <http://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2021-0154>.
16. Scheuer, C. J., Silva, L. J., Neves, J. C. K., Cardoso, R. P., Brunatto, S. F. (2024). Tribological performance of low-temperature plasma carburized AISI 420 martensitic stainless steel. *Surf Coat Tech.*, 476: 130239. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130239>.
17. Schibicheski, K., Bruna, C. E., Lepienski, C. M., de Oliveira, W. R., de Souza, G. B., Serbena, F.C., Cardoso, R. P., das Neves, J. C. K., Borges, P. C. (2023). Identification of Expanded Austenite in Nitrogen-Implanted Ferritic Steel through In Situ Synchrotron X-ray Diffraction Analyses. *Metals.*, 13(10): 1744. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13101744>.
18. Sharma, M. K., Saikia, B. K., Phukan, A., Ganguli, B. (2006). Plasma nitriding of austenitic stainless steel in N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> dc pulsed discharge. *Surf Coat Tech.*, 201 (6): 2407–2413. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.04.006>.
19. Sun, J., Li, J., Xie, J. M., Yang, Y., Wu, W. P., Zhou, X. et al. (2022). Properties of rapid arc discharge plasma nitriding of AISI 420 martensitic stainless: effect of nitriding temperatures. *J Mater Res Technol.*, 19: 4804–4814. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.028>.
14. Raizer Yu. P. Gas Discharge Physics. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
15. Scheuer C. J., Cardoso R. P., Mafra M., Brunatto M. S. F. Effects of the voltage and pressure on the carburizing of martensitic stainless steel in pulsed DC glow discharge. *Mater Res.* 2021. No. 24(6). DOI: <http://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2021-0154>.
16. Scheuer C. J., Silva L. J., Neves J. C. K., Cardoso R. P., Brunatto S. F. Tribological performance of low-temperature plasma carburized AISI 420 martensitic stainless steel. *Surf Coat Tech.* 2024. Vol. 476. Art. 130239. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130239>.
17. Schibicheski K., Bruna C. E., Lepienski C. M., de Oliveira W. R., de Souza G. B., Serbena F.C., Cardoso R. P., das Neves J. C. K., Borges P. C. Identification of Expanded Austenite in Nitrogen-Implanted Ferritic Steel through In Situ Synchrotron X-ray Diffraction Analyses. *Metals.* 2023. Vol. 13, No. 10. Art. 1744. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13101744>.
18. Sharma M. K., Saikia B. K., Phukan A., Ganguli B. Plasma nitriding of austenitic stainless steel in N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> dc pulsed discharge. *Surf Coat Tech.* 2006. No. 201(6). P. 2407–2413. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.04.006>.
19. Sun J., Li J., Xie J. M., Yang Y., Wu W. P., Zhou X. et al. Properties of rapid arc discharge plasma nitriding of AISI 420 martensitic stainless: effect of nitriding temperatures. *J Mater Res Technol.* 2022. No. 19. P. 4804–4814. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.028>.

**ANDRIIENKO OLHA**

Post graduate student,

Department of Electronic Devices and Systems,  
National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-9930-4415>  
E-mail: [aov1911190-eds-21@iit.kpi.ua](mailto:aov1911190-eds-21@iit.kpi.ua)

**TSYBULSKYI LEONID**

PhD, Assoc. Prof.,

Department of Electronic Devices and Systems,  
National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-7431-6417>  
E-mail: [senti-ki@ukr.net](mailto:senti-ki@ukr.net)

**ANDRIIENKO O. V., TSYBULSKYI L. Yu.**

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine*

**SIMULATION OF GAS FLOW THROUGH A PERFORATED PIPE  
IN A COAXIAL DISCHARGE SYSTEM**

**Purpose.** To determine the impact of design parameters of a gas discharge system based on a perforated tube on the nitrogen pressure distribution between the electrodes and to model the physical and topological characteristics of this system to enhance its efficiency.

**Methodology.** The modeling of the gas discharge process was performed using numerical methods to calculate the pressure and gas velocity in a coaxial discharge system. The methodology is based on the Navier-Stokes equations for a single-phase nitrogen flow through a perforated tube, accounting for different flow regimes (laminar and turbulent) as well as variations in gas temperature, viscosity, and density. The Reynolds number is applied to classify the flow regimes.

**Findings.** Modeling indicated that the gas distribution in the discharge system depends on the tube parameters and the location of the holes in the anode. The gas flows unevenly through the holes, leading to non-uniform discharge burning along the system axis. To improve the uniformity of gas distribution, the use of more complex system designs is recommended.

**Originality.** For the first time, the modeling of a gas discharge system with a perforated tube was conducted using a physical-topological approach to study the influence of design parameters on gas pressure distribution. This allowed for the identification of critical factors affecting the uniformity of flow and, consequently, discharge stability.

**Practical value:** The obtained results can be utilized to optimize the design of gas discharge systems in industrial and scientific installations, particularly to ensure discharge stability and uniformity in coaxial systems, thereby enhancing the operational efficiency of such installations.

**Keywords:** gas discharge system; perforated tube; coaxial system; modeling; pressure distribution; nitrogen; Navier-Stokes equations.

УДК 620.97:  
621.31

<sup>1</sup>АСТИСОВА Т. І., <sup>1</sup>КРАВЧЕНКО М. С., <sup>2</sup>ПОСТОРОНКА В. М.,  
<sup>2</sup>КРАВЧЕНКО О. П.

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

<sup>2</sup>Державний університет «Київський авіаційний інститут», Україна

## АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ В ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОМУ MICROGRID

**Мета.** Розробка апаратно-програмного засобу для зберігання та обробки даних, що отримуються з локальної портативної метеостанції та з глобальної мережі даних про погоду для розрахунку коефіцієнту продуктивності сонячної панелі, прогнозування профілів генерації електроенергії та навчання відповідних експертних систем, засобів машинного навчання або нейронних мереж направлених на досягнення максимальної ефективності функціонування електричної системи.

**Методика.** Використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних панелей (СП), в MicroGrid характеризується стохастичним характером генерації електроенергії через залежність потужності генерації електроенергії в MicroGrid з розподіленими СП від погодних умов. Визначальну роль для оцінки ефективності функціонування СП відіграють як технічні характеристики СП, які надає виробник, так і продуктивність СП, яка розраховується на основі даних, що отримуються за довготривалий проміжок часу, при функціонуванні СП, встановлених на вибраній ділянці місцевості з характерними погодними умовами.

**Результати.** Був розроблений апаратно-програмний засіб, який збирає, зберігає та обробляє дані для розрахунку продуктивності СП. Вхідні дані отримуються як з локальної портативної метеостанції, так і з глобальної мережі даних про погоду за допомогою API (Application Programming Interface), їх збереження та обробка забезпечується сервером.

**Наукова новизна.** Збережені вхідні та оброблені дані в подальшому використовуються для прогнозування профілів генерації електроенергії в MicroGrid. Крім того, ці дані можуть бути використані для навчання відповідних експертних систем, засобів машинного навчання або нейронних мереж для досягнення максимальної ефективності функціонування електричної системи.

**Практична значимість.** Оцінка коефіцієнту продуктивності сонячної панелі дозволяє визначити, наскільки ефективно панель перетворює сонячну енергію в електричну: чим вище коефіцієнт продуктивності, тим більше енергії можна отримати з такої сонячної панелі, що допомагає встановити реальні очікувані витрати на електроенергію та оптимізувати систему сонячних панелей для максимального виробництва електроенергії. Крім того, оцінка коефіцієнта продуктивності дозволяє виконувати моніторинг ефективності роботи сонячної панелі в режимі реального часу для виявлення можливих проблем, пов'язаних з забрудненням або пошкодженням панелей.

**Ключові слова:** енергоефективність; MicroGrid; розподілені джерела генерації; сонячні панелі; продуктивність; погодні умови; масиви даних.

**Вступ.** Сучасний етап технологічного розвитку суспільства спричинив розвиток нових концепцій менеджменту та маркетингу в сфері техніко-економічної активності. Попередня енергетична концепція базувалася на такій політиці енергозбереження, де використовувалися вичерпні паливні ресурси та характеризувалася неефективною роботою складових енергетичної системи. Зараз основний напрямок зусиль направляється Зараз основний напрямок зусиль направляється на заміну концепції енергозаощадження концепцією енергоефективності [1]. В рамках концепції енергоефективності функціонування електроенергетичної системи забезпечується, в основному, за рахунок децентралізованих розподілених джерел енергії (Distributed Energy Resources, DER), при цьому спостерігається

тенденція до збільшення кількості джерел генерації електроенергії, які розосереджені в певній локалізації та об'єднані в єдину, так звану MicroGrid [2].

Сонячні панелі (СП) є основним джерелом генерації електричної енергії в MicroGrid, які характеризуються, крім технічних величин, що надає виробник, також і продуктивністю (performance ratio, PR) [3]. Ця величина показує наскільки ефективно панелі перетворюють світлову енергію сонця в електричну, порівняно з максимально очікуваною потужністю СП. Факторами, що впливають на продуктивність СП є, зокрема, неефективність інвертора, неузгодженість роботи фотоелементів у СП, підвищена температура поверхні СП, відбиття падаючого світла від передньої поверхні панелі, забруднення, затінення поверхні модуля та несправності компонентів, з яких складається СП. Проте, основними факторами, які значною мірою впливають на продуктивність СП, є освітленість та температура поверхні панелей, які обумовлюються погодними умовами.

При проектуванні енергоефективних систем, в яких використовуються СП як джерело генерації електроенергії, активно використовуються програмні симуляції. Такі програмні засоби дозволяють моделювати різні аспекти фотоелектричних систем, зокрема геометрію (розташування та орієнтацію сонячних панелей), електричні характеристики панелей, очікувану потужність електроенергії, що генерується та оптимальні параметри системи в цілому [4, 5]. Слід зауважити, що прогнозований профіль генерації електроенергії, що отримується, наприклад, за допомогою програмної симуляції (software) PV SCADA [5], часто не збігається з фактичним профілем. Це спричинюється тим, що в симуляції використовуються дані моніторингу навколишнього середовища, отриманих з метеостанцій, які не знаходяться на ділянках з встановленими СП. Вирішенням цієї проблеми може стати застосування портативної метеостанції, яка здійснює моніторинг навколишнього середовища безпосередньо в місці локалізації СП. Крім того, актуальною є задача накопичення історичних даних про погоду на ділянці, де знаходяться СП з відповідними погодними умовами. Наявність такої бази даних забезпечує можливість уточнення прогнозу погоди на відповідній ділянці для отримання більш точного прогнозованого профілю генерації.

**Постановка завдання.** Метою представленої роботи є розробка апаратно-програмного пристрою, який надає можливість збирати, зберігати та обробляти дані для розрахунку продуктивності СП, встановлених на визначеній ділянці місцевості. Вхідні дані отримуються як з локальної портативної метеостанції, так і з глобальної мережі даних про погоду, збереження та обробка яких забезпечується сервером. Збережені вхідні та оброблені дані в подальшому використовуються для прогнозування профілів генерації електроенергії в MicroGrid. Крім того, ці дані можуть бути використані для навчання відповідних експертних систем [6], засобів машинного навчання [7] та нейронних мереж [8] для досягнення максимальної ефективності функціонування електричної системи.

**Результати дослідження.** Розроблений апаратно-програмний засіб складається з апаратної компоненти, яка містить модулі моніторингу оточуючого середовища та електричних параметрів системи [9], а також сервер, який є програмною частиною і складається з *WEB*-сайту; бази даних та обчислювального блоку (рис. 1).

Серверна частина засобу характеризується можливістю захищеного входу в систему, запису даних, отриманих з метеостанції або з модулів моніторингу, в базу даних. Крім цього, наявність обчислювального модулю в серверній частині дає можливість виконувати відповідну обробку даних, отриманих з бази даних. Також, існує можливість графічної візуалізації масивів даних як вхідних, так і вихідних

Вхідними даними є дані з *WEB*-сайту метеосервісу та дані з системи моніторингу (рис. 2).

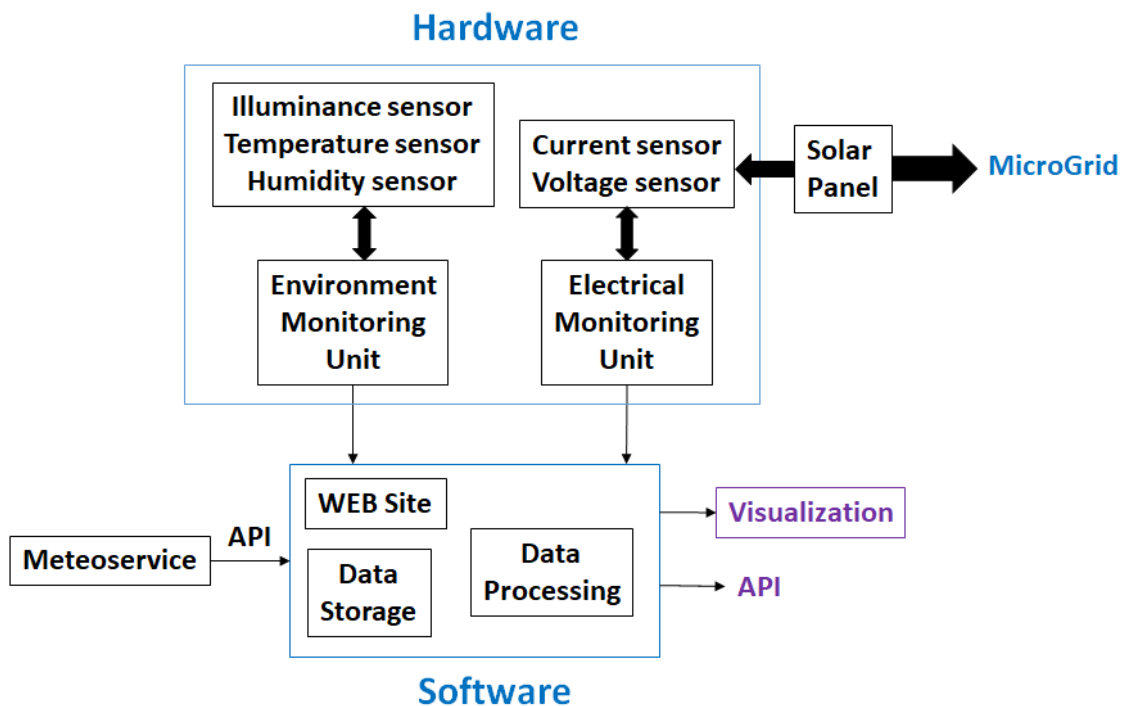


Рис. 1. Структура апаратно-програмного засобу

Дані з WEB-сайту метеосервісу

Дані з системи моніторингу

з  по

Розрахувати ефективність

Дані з WEB-сайту метеосервісу

Kyiv UA

Rain

17 °C

Feels like: 17 °C  
 Max temperature: 18 °C  
 Max temperature: 16 °C

Дані з системи моніторингу

Day	Time	Lumens	Humidity	Temperature	Pressure
• 17,11,2020	0:00:38	3,33	60,11	10,32	761,49
• 17,11,2020	0:01:38	3,35	59,91	10,30	761,51
• 17,11,2020	0:02:38	3,33	60,82	10,30	761,54
• 17,11,2020	0:03:38	3,33	61,42	10,31	761,56
• 17,11,2020	0:04:38	3,33	61,21	10,30	761,56
• 17,11,2020	0:05:38	3,33	60,71	10,30	761,54
• 17,11,2020	0:06:38	3,33	61,10	10,30	761,54
• 17,11,2020	0:07:38	3,33	61,43	10,30	761,53
• 17,11,2020	0:08:38	3,33	61,00	10,28	761,55
• 17,11,2020	0:09:38	3,35	60,71	10,27	761,54
• 17,11,2020	0:10:38	3,33	59,94	10,25	761,53
• 17,11,2020	0:11:38	3,33	60,55	10,24	761,55
• 17,11,2020	0:12:38	3,36	61,28	10,25	761,54
• 17,11,2020	0:13:38	3,33	60,39	10,25	761,56
• 17,11,2020	0:14:38	3,33	61,29	10,24	761,56
• 17,11,2020	0:15:38	3,35	60,82	10,23	761,56
• 17,11,2020	0:16:38	3,33	61,18	10,23	761,57
• 17,11,2020	0:17:38	3,33	60,36	10,22	761,56
• 17,11,2020	0:18:38	3,33	60,85	10,22	761,58
• 17,11,2020	0:19:38	3,33	60,32	10,20	761,59
• 17,11,2020	0:20:38	3,33	61,65	10,19	761,61
• 17,11,2020	0:21:38	3,33	62,00	10,20	761,62
• 17,11,2020	0:22:38	3,33	61,74	10,19	761,62

Київ UA

Rain

17 °C

Feels like: 17 °C  
 Max temperature: 18 °C  
 Max temperature: 16 °C

Вигляд вікна після активації «Дані з системи моніторингу»

Рис. 2. Вікно користувача для вхідних даних

Вихідними (обробленими) даними є дані, які пройшли через обчислювальний модуль, в якому розраховується продуктивність СП та виконується поліноміальна або логарифмічна апроксимація вхідних даних для отримання аналітичних виразів з можливістю візуалізації отриманих результатів. Доступ до всіх даних, що знаходяться на сервері, забезпечується за допомогою API (Application Programming Interface).

Оцінка продуктивності СП виконується на основі даних, отриманих з модулів моніторингу, яка визначається як відношення потужності виробленої електроенергії до потужності сонячного випромінювання, що падає на ці панелі. Продуктивність СП залежить

від їхньої конструкції, матеріалів та технологій виготовлення. Розрізняють максимальну ( $PR_{\max}$ ) та фактичну ( $PR_{\text{факт}}$ ) продуктивності.  $PR_{\max}$  відображає потенційну ефективність СП при оптимальних умовах, тоді як  $PR_{\text{факт}}$  враховує вплив різних факторів, які знижують продуктивність джерела генерації, зокрема це підвищення температури та затінення поверхні СП. Важливо зазначити, що  $PR$  є величиною динамічною і може змінюватись в залежності від умов експлуатації СП. Оптимальні умови для досягнення максимальної продуктивності СП включають належну орієнтацію та нахил панелей, мінімізацію затінення та оптимізацію температури поверхні СП [10].

Оцінка продуктивності СП може перевищувати значення 100%, пов'язано з технічним тестуванням сонячної панелі виробником при стандартних умовах (STC, standard test condition). Слід зауважити, що занадто короткий період вимірювання (менше 1 місяця) є недостатнім для надійного розрахунку продуктивності СП. Крім того, пора року, температурні коливання, які вимірюються на протязі тривалого проміжку часу, особливості просторового розташування СП можуть впливати на кінцевий результат розрахунку її продуктивності. Сильна залежність продуктивності СП від температури призводить до її значних сезонних коливань, які можуть досягати  $\pm 10\%$ .

Традиційно, продуктивність СП розраховується при  $25^\circ\text{C}$  (стандартні умови вимірювання) (рівняння 1)

$$PR = \frac{\sum_i EN_{AC_i}}{\sum_i \left[ P_{STC} \left( \frac{G_{POA_i}}{G_{STC}} \right) \right]} \quad (1)$$

Такий розрахунок дає в результаті більшу величину продуктивності, оскільки СП частіше працюють при  $45^\circ\text{C}$ . Тому, виникає необхідність в усуненні сезонної мінливості величини продуктивності за рахунок використання значення середньої температури СП, відносно якої можна уточнювати значення продуктивності. Таку величину називають «уточненим» її значенням, оскільки вона враховує більшість погодних ефектів, що впливають на продуктивність СП (рівняння 2).

$$PR_{corr} = \frac{\sum_i EN_{AC_i}}{\sum_i \left[ P_{STC} \left( \frac{G_{SL_i}}{G_{STC}} \right) \left( 1 - \frac{\delta}{100} (T_{cell\_avg} - T_{cell_i}) \right) \right]} \quad (2)$$

Різниця між цими рівняннями полягає в тому, що уточнене рівняння містить член для перерахунку потужності з використанням середньої робочої температури СП, яка враховує сумарний вплив факторів навколишнього середовища. Продуктивність СП розраховується за визначений проміжок часу (день, тиждень, місяць, рік).

В рівняннях (1) та (2) змінні означають:

- $PR$  – продуктивність СП (безрозмірна величина);
- $PR_{corr}$  – уточнена продуктивність (безрозмірна величина);
- $E_{AC}$  – вироблена електроенергія ( $\text{kWh}$ );
- $N$  – кількість панелей;
- $P_{STC}$  – номінальна потужність СП за стандартних умов випробувань (STC) ( $\text{kWh}$ );
- $G_{SL}$  – вимірюване за допомогою сенсора освітленості значення освітленості поверхні СП ( $\text{kWh/m}^2$ );
- $i$  – певний момент часу;
- $G_{STC}$  – освітленість поверхні СП при STC ( $1000 \text{ Wh/m}^2$ ).
- $T_{cell}$  – температура поверхні СП, яка обчислюється з даних метеорологічних вимірювань локальної станції ( $^\circ\text{C}$ );

- $T_{cell\_avg}$  – середня температура поверхні СП, яка розраховується при використанні даних, що отримуються з метеосервісів ( $^{\circ}C$ );
- $\delta$  – температурний коефіцієнт ( $\%/^{\circ}C$ ).

$T_{cell\_avg}$  обчислюють за допомогою рівнянь (3)–(5) [11].

$$T_{cell\_avg} = \sum [G_{SL\_j} * T_{cell\_calc\_j}] / \sum [G_{SL\_j}] \quad (3)$$

$$T_m = G_{SL} * \{e^{(a+b*WS)}\} + T_a \quad (4)$$

$$T_{cell} = T_m + (G_{SL}/G_{STC}) * \Delta T_{cnd} \quad (5)$$

де  $G_{SL\_j}$  – значення освітленості поверхні СП на кожну годину, визначене з даних ТМУ та орієнтації поверхні ( $Bm/m^2$ );  $T_{cell\_calc\_j}$  – значення розрахованої робочої температури СП на кожну годину ( $^{\circ}C$ );  $T_m$  – прогнозоване значення температури СП ( $^{\circ}C$ );  $T_a$  – температура повітря ( $^{\circ}C$ );  $WS$  – виміряна швидкість вітру, уточнена до висоти вимірювання 10 метрів (м/с);  $a$  – емпірична величина, що відображає підвищення температури СП під впливом сонячного світла;  $b$  – емпірична величина, що відображає вплив швидкості вітру на температуру СП (с/м);  $e$  – число Ейлера, основа натурального логарифму;  $\Delta T_{cnd}$  – падіння температури ( $^{\circ}C$ );  $j$  – кожна година року (в цілому 8,760 годин).

Результати всіх розрахунків виводяться в табличному та графічному вигляді (рис. 3).

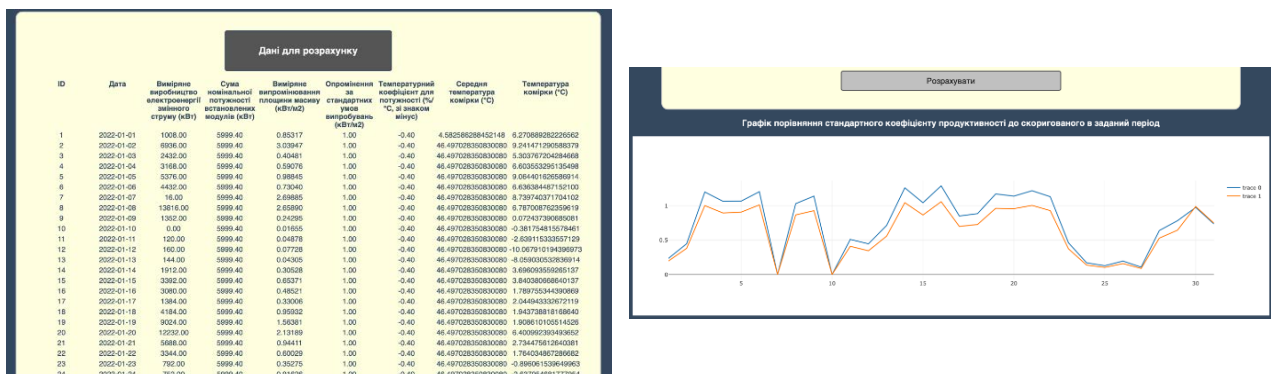


Рис. 3. Результати розрахунку продуктивності СП

В процесорному модулі сервера також виконується поліноміальна або логарифмічна апроксимація вхідних даних для отримання аналітичних виразів з можливістю візуалізації отриманих результатів (рис. 4).

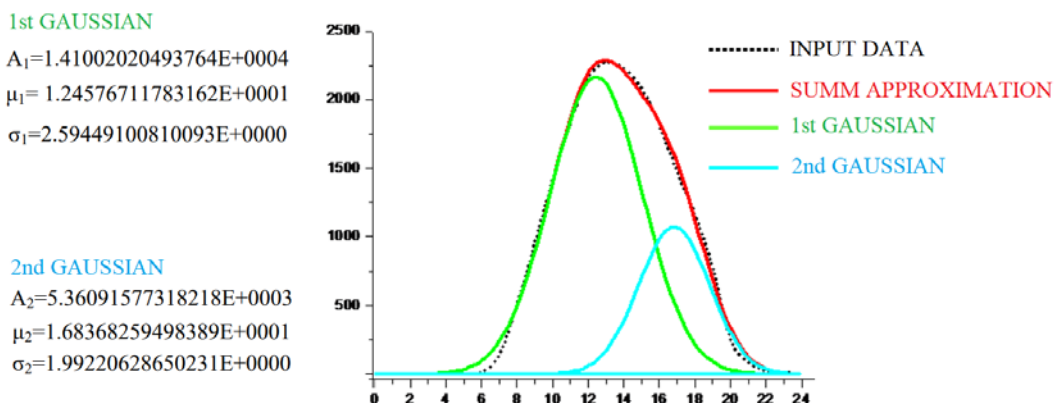
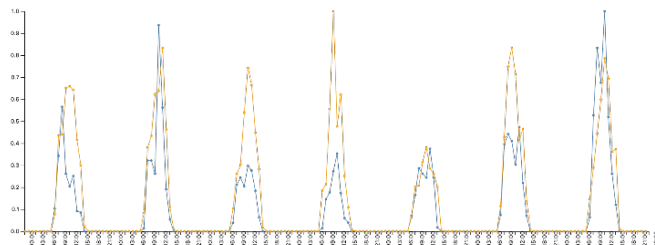
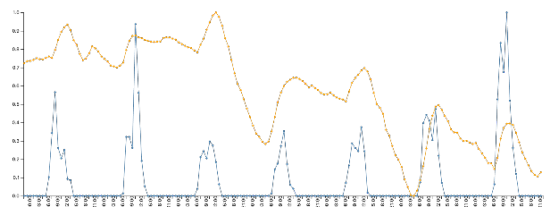


Рис. 4. Апроксимація вхідних даних

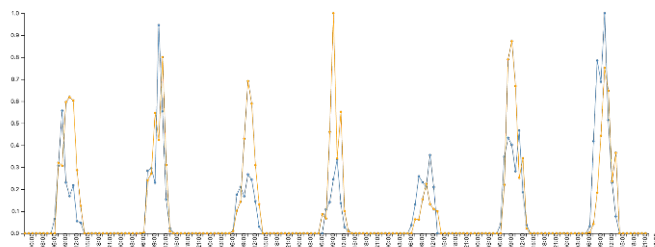
Для вхідних даних виконувалась нормалізація параметрів та оцінювалась кореляція між цими параметрами на протязі одного місяця (рис. 5).



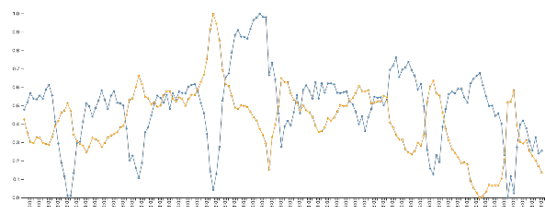
а) Візуалізація даних величин освітленості, отриманих з локальної метеостанції (помаранчева крива) та PVGIS (синя крива)



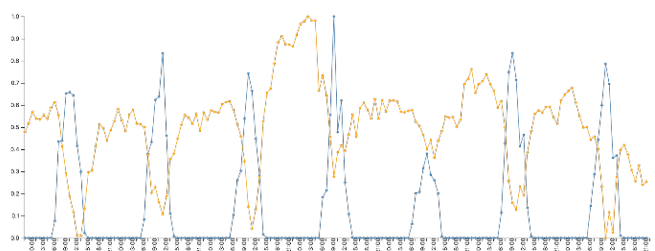
б) Візуалізація даних величин освітленості (синя крива) та температури (помаранче крива) за даними PVGIS



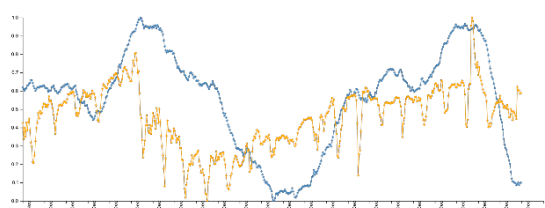
в) Візуалізація даних величин потужності між локальною станцією (помаранчева крива) та PVGIS даними. PVGIS (синя крива)



г) Візуалізація даних величин вологості (синя крива) та температури (помаранчева) за даними локальної станції



д) Візуалізація даних величин освітленості (синя крива) та вологості (помаранчева крива) з локальної метеостанції



е) Візуалізація даних величин тиску (синя крива) та вологості (помаранчева крива) за даними дослідної станції

Рис. 5. Візуалізація даних, які були отримані в обчислювальній частині сервера

### Висновки:

1. Використання розподілених відновлюваних джерел енергії, зокрема СП, в MicroGrid характеризується стохастичним характером генерації електроенергії, яка спричинюється погодними факторами місцевості, де встановлені СП.

2. Визначальну роль для оцінки ефективності функціонування СП відіграють як технічні характеристики СП, які надає виробник, так і величина продуктивності СП, яка розраховується на основі даних, отриманих, при функціонуванні СП, встановлених на ділянках місцевості з характерними погодними умовами за довготривалий проміжок часу.

3. Був розроблений апаратно-програмний засіб, який збирає, зберігає та обробляє дані для розрахунку продуктивності СП, встановлених на визначеній ділянці місцевості. Збережені вхідні та оброблені дані в подальшому використовуються для прогнозування профілів генерації електроенергії в MicroGrid. Крім того, ці дані можуть бути використані для навчання відповідних експертних систем, засобів машинного навчання або нейронних мереж для досягнення максимальної ефективності функціонування електричної системи.

### References

1. ISO 50001:2018 Energy management systems – Requirements with guidance for use. URL: <https://www.iso.org/standard/69426.html>.
2. Distributed Energy Resources Based Microgrid: Review of Architecture, Control, and Reliability. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9376271>.
3. IEC 61724 Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data exchange and analysis, 1998. URL: [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec61724%7Bed1.0%7Den.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec61724%7Bed1.0%7Den.pdf).
4. PVsyst photovoltaic software – A full package for the study of photovoltaic systems. URL: <https://www.pvsyst.com>.
5. PV SCADA – software and hardware complex for monitoring and effective management of industrial solar power plants. URL: <https://kness.energy/pv-scada/>
6. Mayadevi, N., Vinodchandra, S. S., Ushakumari, S. (2014). A Review on Expert System Applications in Power Plants. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 4(1): 116–126. URL: <https://ijece.iaescore.com/index.php/IJECE/article/download/5607/4918>.
7. Forootan, M. M., Larki, I., Zahedi, R., Ahmadi, A. (2022). Machine Learning and Deep Learning in Energy Systems: A Review. *Sustainability*, 14:4832. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14084832>.
8. Khodayar, M., Regan, J. (2023). Deep Neural Networks in Power Systems: A Review. *Energies*, 16:4773. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16124773>.
9. Kravchenko, O. P., Manoïlov, E. H., Arzikulov, T. S. (2020). Monitorynh ta upravlinnia parametramy v smart-systemakh elektropostachannia [Monitoring and parameters management in Smart power supply systems]. *I Vseukrainska konferentsiia zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh "Innovatyka v osviti, nauksi ta biznesi: vyklyky ta mozhlyvosti" = Innovation in education, science and business: challenges and opportunities: materials of*

### Література

1. ISO 50001:2018 Energy management systems – Requirements with guidance for use. URL: <https://www.iso.org/standard/69426.html>.
2. Distributed Energy Resources Based Microgrid: Review of Architecture, Control, and Reliability. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9376271>.
3. IEC 61724 Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data exchange and analysis. 1998. URL: [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec61724%7Bed1.0%7Den.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec61724%7Bed1.0%7Den.pdf).
4. PVsyst photovoltaic software – A full package for the study of photovoltaic systems. URL: <https://www.pvsyst.com>.
5. PV SCADA – software and hardware complex for monitoring and effective management of industrial solar power plants. URL: <https://kness.energy/pv-scada/>
6. Mayadevi N., Vinodchandra S. S., Ushakumari S. A Review on Expert System Applications in Power Plants. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2014. Vol. 4 (1). P. 116–126. URL: <https://ijece.iaescore.com/index.php/IJECE/article/download/5607/4918>.
7. Forootan M. M., Larki I., Zahedi R., Ahmadi A. Machine Learning and Deep Learning in Energy Systems: A Review. *Sustainability*. 2022. No. 14. Art. 4832. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14084832>.
8. Khodayar M., Regan J. Deep Neural Networks in Power Systems: A Review. *Energies*. 2023. No. 16. Art. 4773. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16124773>.
9. Кравченко О. П., Манойлов Е. Г., Арзікулов Т. С. Моніторинг та управління параметрами в смарт-системах електропостачання. *I Vseukrainska konferentsiia zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh "Innovatyka v osviti, nauksi ta biznesi: vyklyky ta mozhlyvosti" (Київ, 17 листопада 2020 р.)*. К.: КНУТД, 2020.

the 1st All-Ukrainian Conference of Higher Education Graduates and Young Scientists (Kyiv, November 17, 2020, KNUTD), P. 262–266. URL: [https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/17463/1/Innovatyka2020\\_P262-266.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/17463/1/Innovatyka2020_P262-266.pdf) [in Ukrainian].

10. Performance ratio – Quality factor for the PV plant. URL: <https://files.sma.de/downloads/Perfratio-TI-en-11.pdf>.

11. Incropera, F. P., De Witt, D. P. (1996). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4th Edition. New York, John Wiley & Sons. 886 p.

C. 262–67. URL: [https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/17463/1/Innovatyka2020\\_P262-266.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/17463/1/Innovatyka2020_P262-266.pdf).

10. Performance ratio – Quality factor for the PV plant. URL: <https://files.sma.de/downloads/Perfratio-TI-en-11.pdf>.

11. Incropera F. P., De Witt D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4th Edition. New York, John Wiley & Sons, 1996. 886 p.

**ASTISTOVA TETYANA**

Candidate of Technical Science, Associate Professor,  
Department of Computer Sciences,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-8452-4797>  
Scopus Author ID: 6506601603  
E-mail: [astistova@ukr.net](mailto:astistova@ukr.net)

**KRAVCHENKO MYKOLA**

Student, Department of computer science,  
Faculty of Mechatronics and Computer Technologies,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0003-9262-9198>  
E-mail: [mykola.kravchenko19@gmail.com](mailto:mykola.kravchenko19@gmail.com)

**POSTORONKA VALERIYA**

Student, Department of Intelligent Cybernetic Systems,  
Faculty of Computer Science and Technology,  
National Aviation University, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0007-4071-826X>  
E-mail: [valeriia.postoronka@gmail.com](mailto:valeriia.postoronka@gmail.com)

**KRAVCHENKO OLGA**

Candidate of Technical Science, Associate Professor,  
Department of Intelligent Cybernetic Systems,  
Faculty of Computer Science and Technology,  
National Aviation University, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-7262-0899>  
E-mail: [olgakravchenko111@gmail.com](mailto:olgakravchenko111@gmail.com)

<sup>1</sup>ASTISTOVA T. I., <sup>1</sup>KRAVCHENKO M. S., <sup>2</sup>POSTORONKA V. M., <sup>2</sup>KRAVCHENKO O. P.

<sup>1</sup> Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<sup>2</sup> National Aviation University, Ukraine

## SOFTHARD TOOL FOR SOLAR PANELS PERFORMANCE ESTIMATION FOR EFFECTIVE FUNCTION IN MICROGRID

**Purpose.** Design of a soft-hardware tool that is able to store and process data received from a local meteoservice device and from a global weather data network in order to estimate the solar panel performance, predict electricity generation profiles, and train appropriate expert systems, machine learning tools, or neural networks aimed at achieving maximum efficiency of the electrical system.

**Methodology.** Using renewable energy sources in MicroGrid, particularly solar panels (SPs), is characterized by the stochastic nature of power generation due to the dependence of power generation capacity in MicroGrid with distributed SPs on the weather condition. A decisive role in assessing the efficiency of the SP operation is played by both the technical characteristics of the SP, which is provided by the manufacturer, and the performance of the SP, which is calculated on the basis of data obtained over a long period of time, during the operation of the SP installed in the selected area with appropriate weather condition.

**Findings.** A hardware and software tool has been developed that get ability in collecting, storing and processing data to calculate the performance of the SP. Input data is obtained both from a local meteoservice point and from a global meteo data using an API (Application Programming Interface), while data storing and processing is implemented with the server.

**Originality.** All data both stored and processed is used to make prognostics in forming power generation profile as concerned to the MicroGrid. Moreover, the data can be applied in training whether an expert system, or in machine and neural networks learning to maximize the efficiency of the electrical system.

**Practical value.** Evaluating the solar panel's performance factor allows to determine how efficiently the solar panel converts solar energy into electrical energy: the higher the performance factor, the more energy can be obtained from such a solar panel, which helps to establish realistic expected electricity costs and optimize the solar panel system for maximum electricity production. In addition, the performance factor assessment allows during real-time monitoring of the solar panel's performance to identify possible issues related to contamination or damage to the panels.

**Keywords:** energy efficiency; MicroGrid; distributed generation sources; PV panel; performance; weather parameter; data array.

УДК 004.384

АСТІСТОВА Т. І., СЕДЛЯР А. О.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

## РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ОРИГІНАЛЬНОСТІ ТЕКСТІВ

**Мета.** Розробити програмне забезпечення, що поєднує стандартні методи та технології штучного інтелекту для оцінки оригінальності тексту при написанні наукових робіт.

**Методика.** В основу розробки програмного забезпечення було покладено теоретичні та експериментальні дослідження, які використовуються для аналізу методів розпізнавання текстів генерованих штучним інтелектом, виборі та аналізі нейронної мережі для виявлення патернів та відповідних закономірностей при написанні тексту людиною та штучним інтелектом та інтеграції цієї моделі в програмне забезпечення. для перевірки тексту на оригінальність, реалізація технологій аналізу тексту.

**Результати.** Основні результати роботи можна розділити на три взаємопов'язані аспекти: аналітичний, проектувальний і практичний, кожен з яких зробив вагомий внесок у досягнення поставленої мети. В результаті дослідження було здійснено ґрунтовний аналіз предметної області, розглянуто поняття штучного інтелекту, його архітектуру, функціонування нейронних мереж та їх застосування для аналізу текстів, технічні характеристики і можливості сучасних моделей ШІ, а також аспектам їхньої інтеграції у процес перевірки текстів, висвітлено питання академічної доброчесності, включаючи визначення плагіату, його види та культурні особливості сприйняття цього явища у процесах навчання й наукової діяльності, створено теоретичний фундамент для розроблення інструмента, який здатен враховувати як технічні, так і етичні аспекти.

Докладно розглянуто структуру програми, її алгоритми, методи інтеграції з API для аналізу текстів та формату зберігання даних, розроблено алгоритм подібності, який став основою для виявлення схожості текстів. Це дозволило створити чітку та логічну архітектуру продукту, яка забезпечує його функціональність та ефективність.

**Наукова новизна.** Запропоноване оригінальне рішення у вигляді інтегрованої системи яка має поєднувати класичні методи перевірки тексту на оригінальність з розпізнаванням текстів, створених штучним інтелектом, що є важливим кроком на шляху до доказу академічної доброчесності в контексті, коли штучний інтелект буде використовуватися все ширше в багатьох сферах нашого життя.

**Практична цінність.** Програмне забезпечення для технологій обробки тексту представляє собою комплексне дослідження, спрямоване на розроблення програмного продукту, здатного ефективно виявляти плагіат і аналізувати тексти, створені за допомогою штучного інтелекту. Розроблений інструмент відкриває нові можливості для боротьби з академічною не доброчесністю, сприяє автоматизації рутинних процесів і підтримує етичні стандарти у сфері освіти та науки.

**Ключові слова:** програмне забезпечення; API; штучний інтелект; нейронна мережа; патерни; JSON; C# ;Visual Studio; плагіат; SQLite.

**Вступ.** Штучний інтелект остаточно перестав бути науковою фантастикою. З появою ШІ трансформується світова економіка та життя мільярдів людей. Генеративний штучний інтелект (ШІ) став революційною парадигмою в галузі машинного навчання, що дозволяє синтезувати складні та реальні дані за допомогою обчислювальних засобів. Здатність ШІ створювати дані, які відображають характеристики реальної інформації, знайшла застосування в таких різноманітних сферах, як комп'ютерний зір, обробка природної мови, написання музики та пошук нових ліків [1].

Машинне навчання (Machine Learning, ML) – це галузь штучного інтелекту, яка займається розробкою алгоритмів, що дозволяють комп'ютерам навчатися самостійно. Завдяки моделям ML машини здатні вирішувати широкий спектр задач, пов'язаних із аналізом даних, без потреби в конкретних алгоритмах або детальних інструкціях. Сфера застосування

машинного навчання зазвичай орієнтована на вирішення конкретних завдань, що потребують обробки інформації.

Ціль технологій штучного інтелекту полягає у відтворенні інтелектуальних здібностей і поведінки людини в різних ситуаціях. Сьогодні можливості машинного навчання доступні практично кожному. Наприклад, активуючи камеру на смартфоні, користувач користується алгоритмами, що лежать в основі мобільної зйомки, або ж може скористатися безкоштовною версією ChatGPT через веб-браузер.

Штучний інтелект високого рівня здатний моделювати шаблони мислення, переносити накопичений досвід на різноманітні нові задачі, демонструвати абстрактне мислення та творчі здібності. Крім того, він враховує соціальні й етичні аспекти під час прийняття рішень.

На сьогодні за призначенням виділяють три види штучного інтелекту: III вузького призначення – Artificial narrow Intelligence (ANI); III загального призначення – Artificial general Intelligence (AGI), Штучний супер-інтелект – Artificial super-Intelligence (ASI) [2].

Розглянемо ці види :

1. ANI – це алгоритм, який спеціалізується на виконанні одного конкретного завдання або працює в певній сфері знань, наприклад, у пошукових системах чи управлінні безпілотними транспортними засобами. Алгоритми машинного навчання належать до категорії ANI

2. AGI – універсальна система III, здатна вирішувати будь-які інтелектуальні завдання на рівні людських можливостей. AGI оперує логічними висновками та абстрактним мисленням; прикладом таких систем є великі мовні моделі (LLM).

3. ASI – це III, який у всіх аспектах перевершує людські здібності, зокрема в креативності та соціальних взаємодіях. Людство активно наближається до етапу створення таких систем.

У сфері інформаційних технологій машинне навчання вважається ключовим напрямком Data Science. У певні періоди ці терміни навіть використовували як взаємозамінні. Спеціаліст з Data Science зазвичай повинен володіти знаннями у сфері машинного навчання, включаючи розуміння алгоритмів, знання мов програмування (зокрема Python) та основ математичного аналізу й статистики.

Штучний інтелект – це комп'ютери, які можуть імітувати людський інтелект і поведінку, а глобальне навчання – це підмножина машинного навчання, яке слідує за нейронними мережами [3].

Алгоритми глибокого навчання є підмножиною машинного навчання, але у прикладних завданнях їх все частіше розглядають як окремий повноцінний напрямок розвитку III [4]. Глибоке навчання базується на штучних нейронних мережах – алгоритмічних структурах, що моделюють принципи людського абстрактного мислення. Великі мовні моделі та генеративний III створені саме на основі технологій глибокого навчання. Цей напрямок швидко розвивається, охоплюючи такі сфери, як передовий комп'ютерний зір та системи розпізнавання природної мови. Сучасні нейронні мережі вже демонструють результати, які в окремих галузях досягають рівня людських можливостей або навіть перевершують їх.

Звичайні комп'ютерні системи використовують алгоритмічний підхід, тобто слідують набору інструкцій, щоб вирішити проблему [5]. Нейронні мережі та звичайні алгоритмічні обчислення не конкурують, а доповнюють один одного. Є завдання, які більше підходять для алгоритмічного підходу, наприклад, арифметичні операції, і завдання, які більше підходять для підходу нейронних мереж. Нейронні мережі обробляють інформацію подібно до того, як це робить людський мозок. ANN натхненний тим, як працюють біологічні нервові системи, такі як мозок – нейронні мережі навчаються на прикладі [13].

Нейронні мережі широко використовуються в неконтрольованому навчанні (рис. 1) для того, щоб навчитися краще представляти вхідні дані. Наприклад, маючи набір текстових

документів, НМ може навчитися відображення від документа до вектора дійсних значень таким чином, щоб результуючі вектори були схожими для документів зі схожим змістом, тобто зі збереженням відстані [6].

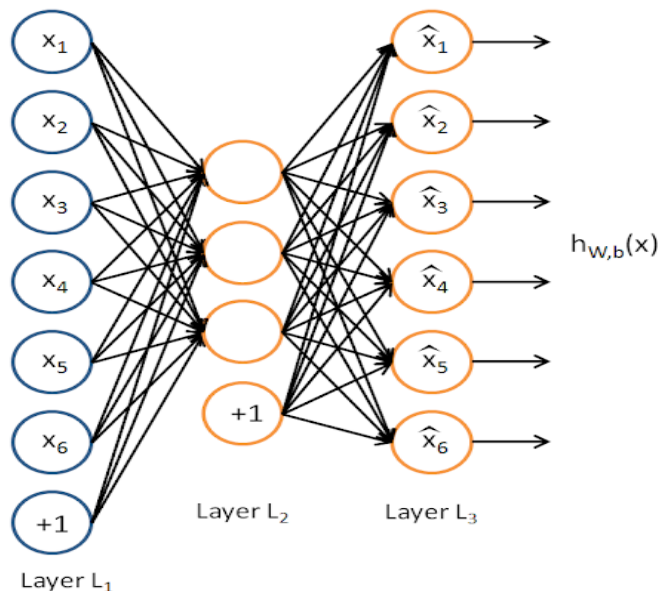


Рис. 1. Приклад неконтрольованого навчання нейронної мережі

Навчання під контролем, яке ще називають контрольоване машинне навчання, є однією з під категорією машинного навчання та штучного інтелекту. Його особливістю є використання маркованих наборів даних для навчання алгоритмів, які класифікують дані або точно прогнозують результати.

Коли вхідні дані подаються в модель, вона коригує свої ваги до того моменту, доки модель не стане налаштована належним чином, що відбувається в межах процесу перехресної валідації. Контрольоване навчання надає покращені можливості організаціям вирішувати різноманітні реальні проблеми в масштабі, для прикладу можна назвати класифікацію спамових повідомлень десь в ізольованій папці від вашої поштової скриньки. Його можна використовувати для побудови високоточних моделей машинного навчання.

Навчання з контролем використовує навчальний набір даних для того, щоб навчити моделі генерувати бажаний результат. Цей навчальний набір даних містить вхідні значення та правильні вихідні результати, що дозволяє моделі вчитися з часом. Алгоритм оцінює свою точність за допомогою функції втрат, коригуючи параметри до тих пір, поки помилка не буде зменшена до прийняттого рівня [7].

**Постановка задачі.** Реалізація технологій ШІ в створенні інструмента для оцінки оригінальності текстів є розробкою системи, що буде поєднувати систему порівняння текстів з технологіями штучного інтелекту. Враховуючи вище зазначену мету та особливості системи яку необхідно розробити, можна сформулювати деякі вимоги які необхідно виконати для демонстрації об'єднання системи розпізнавання плагіату з методами ШІ, а саме:

- реалізація алгоритму перевірки текстів на плагіат;
- мати можливість інтеграції з API для виявлення текстів, створених штучним інтелектом;
- здійснення локального збереження робіт для подальшого використання в аналізі;
- розробити інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс користувача;
- забезпечити сумісність з операційною системою Windows.

**Реалізація задачі.** Це буде нейронна мережа, яка навчена розпізнавати патерни та закономірності, що використовує штучний інтелект для написання текстів, які в подальшому можуть бути використаними недобросовісними учасниками навчального процесу для написання наукових робіт.

Нажаль навіть при наявності доступних та реалізованих архітектури нейронних мереж для створення власної системи пошуку тексту, що написаний електронними помічниками, такими як chat GPT або Copilot, потрібно провести процес навчання нейронної мережі. Оскільки для реалізації настільки масштабного проекту з адекватними результатами необхідно залучити незмірні кількості обчислювальних потужностей, залучити команду спеціалістів з глибокими знаннями окремих аспектів робочого процесу які неможливо зосередити в окремому індивіді та зібрати базу робіт гігабайтних, а краще терабайтних масштабів, що остаточно та обов'язково означає залучання значних фінансових та інших ресурсів, і призводить до закономірного рішення використання готової системи використовуючи механізми API.

Середовище розробки – це важливий набір інструментів, конфігурацій і процесів, які розробники використовують для створення, тестування та розгортання програмного забезпечення [10].

Для реалізації цього проекту було обрано середовище програмування Visual Studio, а мовою написання програми C#. Алгоритмом аналізу тексту на плагіат обрано косинусну подібність.

Косинусна подібність – це метрика, яка використовується для визначення косинуса кута між двома ненульовими векторами в багатовимірному просторі. Це міра орієнтації, а не величини, в діапазоні від -1 до 1. В контексті схожості тексту ця метрика забезпечує надійний спосіб оцінити схожість між двома наборами текстових даних [8].

Математичне рівняння [1] косинусної подібності між двома ненульовими векторами:

$$\text{подібність} = \cos(\theta) = \frac{A * B}{\|A\| \|B\|}, \quad (1)$$

де  $\cos \theta$  – це косинус кута  $\theta$  між двома векторами A і B. Менший кут відповідає більшій схожості.

В контексті обробки природної мови – це міра того, наскільки схожі ідеї та концепції, представлені в двох фрагментах тексту.

Загалом, одним з основних завдань систем оцінювання оригінальності текстів є перетворення технічних результатів роботи алгоритмів у формат, зрозумілий кінцевому користувачу. У випадку аналізу на основі косинусної схожості результати, отримані в діапазоні [0,1], слід інтерпретувати як показник схожості тексту. Для цього результати нормалізуються і представляються відповідно [9].

Коефіцієнт косинусної подібності [2] коливається від 0 (немає подібності) до 1 (повністю подібний) після проведення порівняння. Для того, щоб різниця значень сприймалася більш наочно, вони перетворюються у відсоткові значення шляхом множення результату на 100.

$$\text{Схожість (\%)} = \cos \theta * 100. \quad (2)$$

Наприклад, якщо значення  $\cos(\theta)$  дорівнює 0,75 означає, що текст має 75% схожості з базовим зразком

Шляхи вирішення проблеми порівняння тексту, це методи аналізу мовних моделей, синтаксису та стилю для виявлення контенту, написаного ШІ.

Це пов'язано з тим, що навіть при високому ступені вільного володіння мовою, який може зробити її схожою на людську, ШІ завершує текст з певним «відбитком» у структурі та

лексиці. Більше того, інструменти розпізнавання навчаються на великих вибірках як людських, так і штучно створених текстів, щоб виявляти такі шаблони, які набагато рідше зустрічаються в людському письмі. Наприклад, штучний контент може використовувати повторювані структури речень, передбачувані фрази або неприродний вибір слів, які звучать відшліфовано, але позбавлені нюансів людської експресії.

Інший підхід пов'язаний з моделюванням ймовірностей. Моделі ШІ розпізнають ймовірні комбінації слів і структур речень, які органічно виглядають у мові. Підозри на причетність ШІ виникають, коли патерни слів у тексті відхиляються від цих органічних патернів. У зв'язку з цим OpenAI використовує цей вид імовірнісного аналізу для оцінки того, наскільки той чи інший твір у класифікаторі ШІ написаний людиною, серед інших інструментів

В даній роботі використання API зумовлено нераціональною кількістю фінансових та інших ресурсів які потрібно використати для навчання власної нейронної мережі для пошуку фрагментів тексту створених за допомогою штучного інтелекту. Пошук в тексті штучного інтелекту втілено з використанням Application Programming Interface. API спрощують і прискорюють розробку додатків і програмного забезпечення, дозволяючи розробникам інтегрувати дані, послуги та можливості з інших додатків замість того, щоб розробляти їх з нуля [12].

Процес створення проекту є обов'язковим і ключовим моментом створення системи представлено на рис. 2.

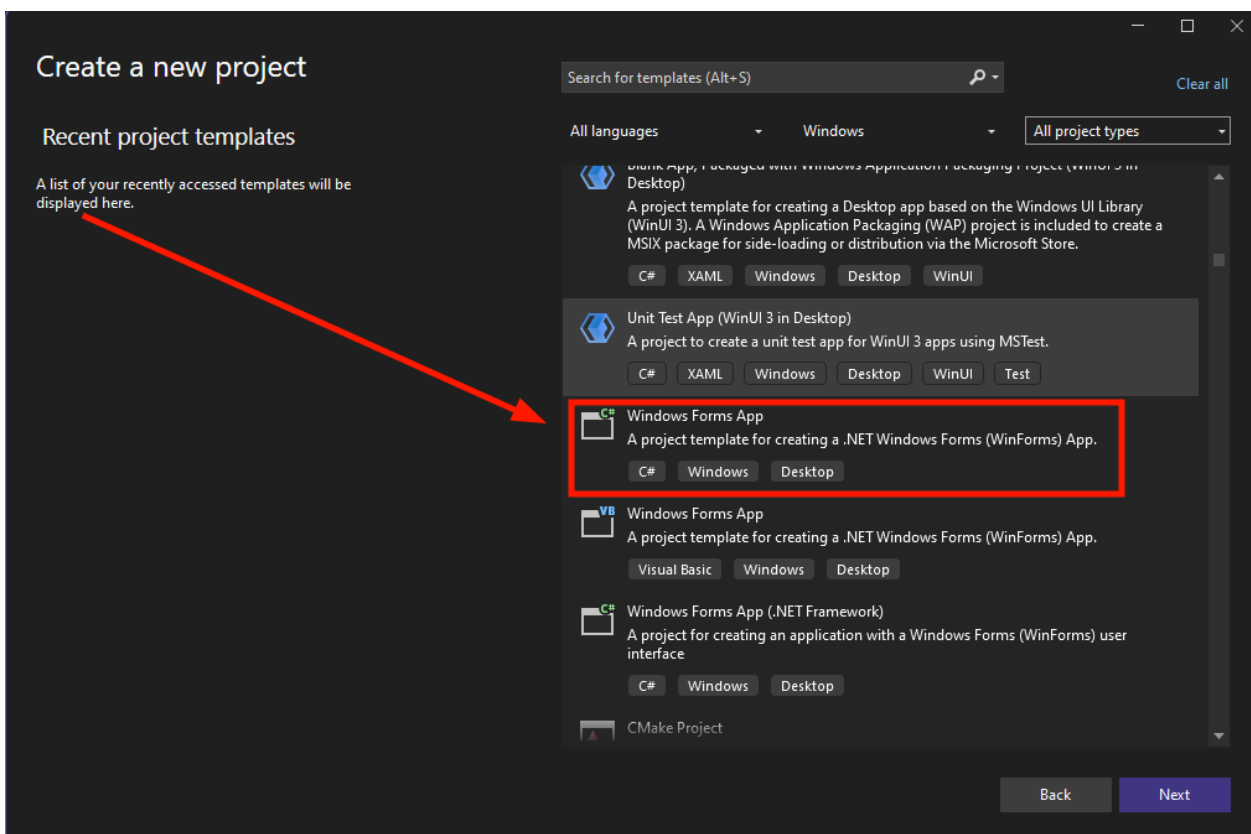


Рис. 2. Створення проекту

Створюємо базу даних в якій будуть зберігатись роботи для аналізу (рис. 3).

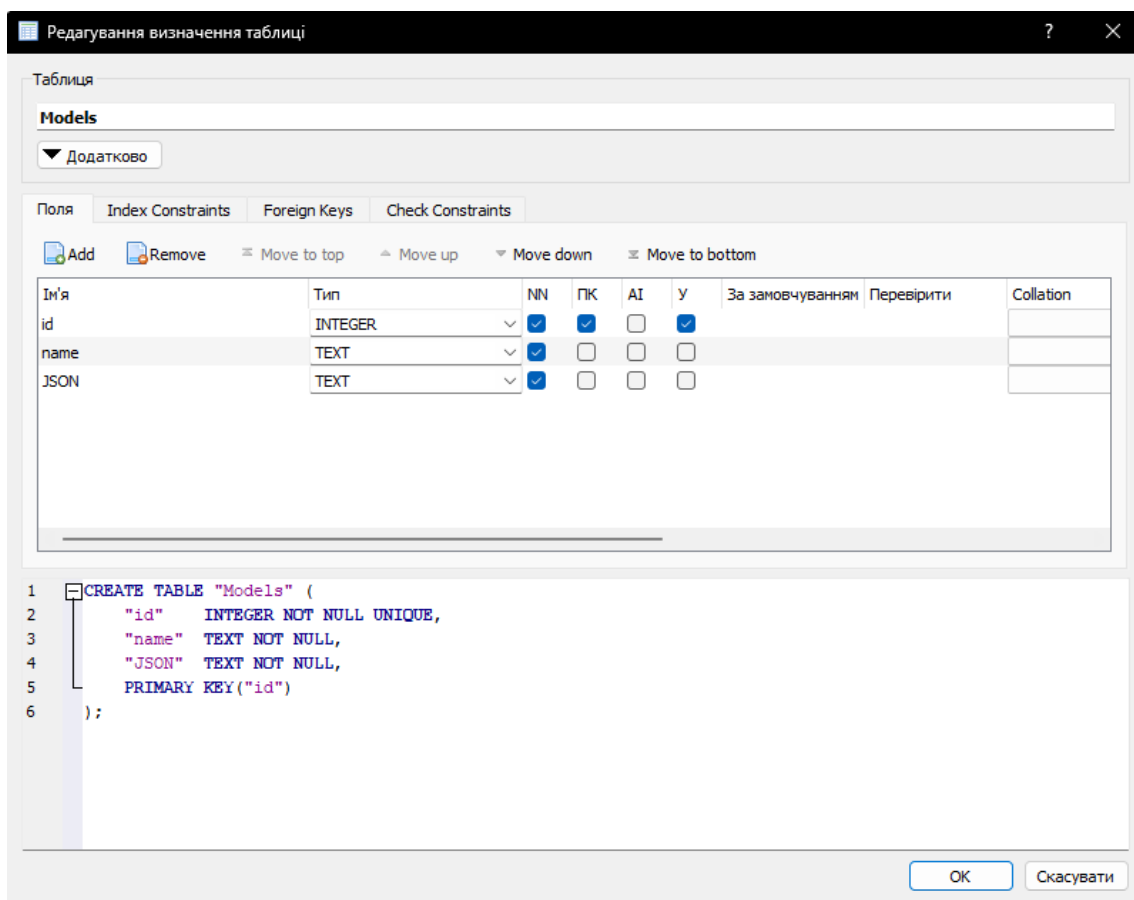


Рис. 3. Створена база даних

Тепер, коли усі обов'язкові етапи налаштування пройдені ми можемо перейти до підключення БД до проекту, шляхом створення відповідного програмного коду (рис. 4).

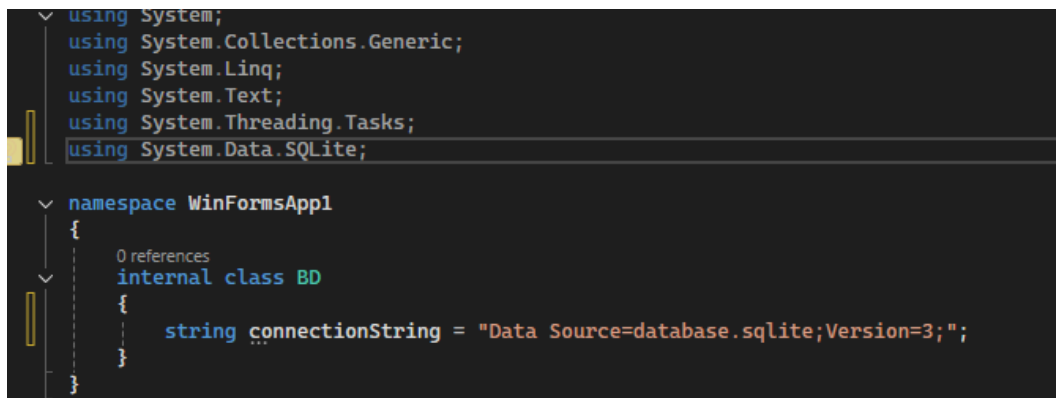


Рис. 4. Скріншот коду

Для зручності використання застосунку клієнтом потрібно реалізувати систему яка зможе надати можливість зручно обирати файл формату docX і зчитувати наведену в ньому інформацію в змінну типу string для подальших маніпуляцій. Для реалізації цього аспекту обрано бібліотеку під назвою DocX,

Для користувача створимо візуальний інтерфейс у вигляді клавіши Вибрати документ для аналізу (рис. 5).

## Вибрати документ для аналізу

Рис. 5. Клавiша Вибрати документ для аналізу

Функціоналом для цієї клавiші буде окрема функція, яка при натисканні на клавiшу викликає подію, що відкриває вікно обрання файлу

Також для порівняння робіт між собою неможливо обійтись без можливості функціонального вирішення питання зчитування файлів з бази даних наукових робіт призначених для перевірки. Реалізуємо цю задачу за допомогою створеної функції ReadDocFile (рис. 6, що повинна брати інформацію з створеної бази даних та по чергово записує цю інформацію в окремий масив даних для подальшого зручного використання при порівнянні текстів.

```
private void ReadDocFile(string filePath)
{
    try
    {
        // Відкриваємо документ
        using (var document = DocX.Load(filePath))
        {
            // Отримуємо весь текст документа
            string content = document.Text;

            // Виводимо в консоль або записуємо в змінну
            MessageBox.Show(content);
        }
    }
    catch (Exception ex)
    {
        MessageBox.Show($"Помилка: {ex.Message}");
    }
}
```

Рис. 6. Програмний код функції

Останнім, але не менш важливим аспектом роботи з JSON, є можливість запису створених об'єктів в розроблену базу даних, цей процес має автоматично проводитись при закінченні аналізу й порівняння обраної роботи. JSON – це загальний формат для представлення значень і об'єктів [11].

Такий підхід забезпечить те, що при перевірці наступної роботи, які частіше за все перевіряються одразу великим набором, робота що перевіряється в даний момент буде використовуватись для порівняння, при чому не змусить користувача напружено контролювати цей процес і покращить досвід роботи з створеним проектом.

Побудова алгоритму методу косинусної подібності була виконана мовою C#, як і весь проект, та бібліотекою RegularExpressions

Виконавши програмну частину проведемо тестування відповідності на плагіат і подивимось на косинус кута двох тестових фраз, що в майбутньому буде перетворений у відсоткове значення.

Розглянемо тестову фразу номер 1 – This is a sample document і тестову фразу 2 – This document is a sample. Плагіат цих тестових фраз дорівнює 1 (рис. 7).

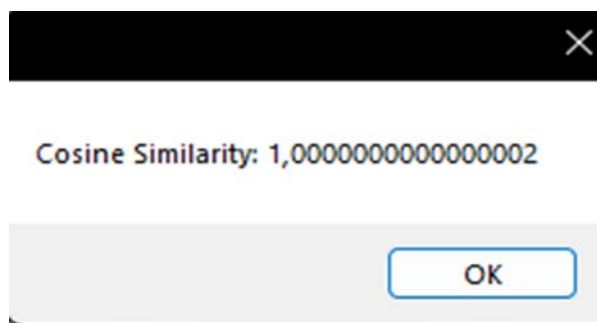


Рис. 7. Результат плагіату текстових фраз

Перевірка текстових фраз на наявність ШІ була проведена з використанням API. Створено програмний код, який розділяє текст на частини залежно від заданої мінімальної та максимальної кількості слів і перевіряє ці частини через API сервісу Grammarly. Це здійснюється методом SplitTextIntoParts, який працює з масивом слів і створює рядки заданої довжини, об'єднуючи їх назад у частини тексту.

Потім програма створює HTTP-запит для доступу до API Grammarly. Вона починає з відправки GET-запиту для отримання початкової сторінки, де зберігаються необхідні cookie-файли. Ці файли потрібні для авторизації подальших запитів.

Далі кожна частина тексту, отримана після розділення, відправляється через POST-запити до API Grammarly, використовуючи збережені cookie-файли. Результати обробки кожної частини тексту виводяться на екран.

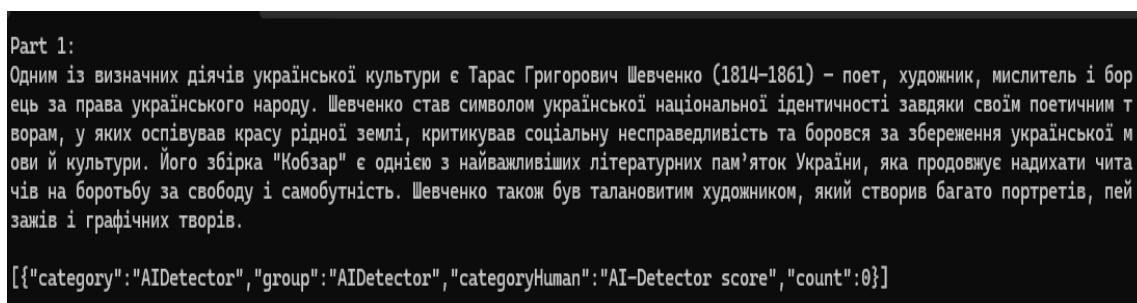


Рис. 8. Результат відповіді на запит для тестової фрази

Результати аналізу тесту на використання ШІ повертаються значенням у JSON форматі. Це останній рядок у фрагменті (рис. 8), де значення count = 0 говорить про те, що штучний інтелект не був використаний.

**Висновки.** Розробка програмного забезпечення для технологій обробки тексту представляє собою комплексне дослідження, спрямоване на розроблення програмного продукту, здатного ефективно виявляти плагіат і аналізувати тексти, створені за допомогою штучного інтелекту.

В роботі було реалізовано такі аспекти програми:

- Підключили базу даних, що дозволить нам зберігати роботи студентів призначені для пошуку плагіату. Кожна робота в цій базі покращує результати аналізу для наступних перевірок.

- Зчитування docX файлів, що надасть можливість спростити використання цього продукту користувачами та зекономити час завдяки зручному та інтуїтивно зрозумілому способу додавання робіт в програму.

- Робота з JSON – конвертація, запис та зчитування JSON файлів дасть можливість краще працювати з базою даних та полегшить впровадження технологій API які використовують даний формат для надання результатів роботи.

- Реалізація методу косинусної подібності створить надійний інструмент виявлення не добросовісного копіювання змісту чужих робіт і є важливим аспектом цієї роботи.

- Використання API замінить дороге та ресурсне навчання власної нейронної мережі для пошуку тексту написаним штучним інтелектом.

Результатом стало створення потужного інструмента, який допомагає не лише виявляти плагіат, але й сприяє збереженню академічної добросовісності.

Таким чином, проведені дослідження та практична реалізація довели, що інтеграція технологій штучного інтелекту у процес перевірки текстів на оригінальність є перспективним напрямом. Розроблений інструмент відкриває нові можливості для боротьби з академічною недобросовістю, сприяє автоматизації рутинних процесів і підтримує етичні стандарти у сфері освіти та науки.

### References

1. Deckler, G. (2022). Learn Power BI – Second Edition: A comprehensive, step-by-step guide for beginners to learn real-world business intelligence: Model. 2nd ed. Publisher Packt Publishing. 8 p.
2. Tkachenko, R. O., Kustra, N. O., Pavliuk, O. M., Polishchuk, U. V. (2014). *Zasoby sztuchnoho intelektu: navch. posibnyk* [Means of artificial intelligence: a textbook]. Lviv: Lviv Polytechnic University Press. 204 p. [in Ukrainian].
3. Nikolsky, Y. V. (2013). *Systemy sztuchnoho intelektu: navch. posibnyk* [Systems of artificial intelligence: a textbook]. Lviv: Magnolia-2006. 279 p. [in Ukrainian].
4. Hlybovets, M. M., Oletsky, O. V. (2002). *Shtuchnyi intelekt* [Artificial Intelligence]. Kyiv: Kyiv-Mohyla Academy. 364 p. [in Ukrainian].
5. Nikolsky, Y. V., Pasichnyk, V. V., Shcherbyna, Y. M. (2013). *Systemy sztuchnoho intelektu: navch. posib.* [Artificial Intelligence Systems: a textbook]. Lviv: Magnolia-2006. 279 p. [in Ukrainian].
6. What is a Neural Network? AWS. URL: <https://aws.amazon.com/what-is/neural-network/>
7. Simon, J. D. Prince, *Understanding Deep Learning: Reinforcement learning*. 11 p.
8. Varun (2020). Cosine similarity: How does it measure the similarity, Maths behind and usage in Python. *Medium*. 27.09.2020. URL: <https://towardsdatascience.com/cosine-similarity-how-does-it-measure-the-similarity-maths-behind-and-usage-in-python-50ad30aad7db>.
9. Prakash, A. (2023). Understanding Cosine Similarity: A key concept in data science. *Medium*. 21.09.2023. URL: <https://medium.com/@arjunprakash027/understanding-cosine-similarity-a-key-concept-in-data-science-72a0fcc57599>.

### Література

1. Deckler G. Learn Power BI – Second Edition: A comprehensive, step-by-step guide for beginners to learn real-world business intelligence: Model. 2nd ed. Publisher Packt Publishing, 2022. 8 p.
2. Ткаченко Р. О., Кустра Н. О., Павлюк О. М., Поліщук У. В. *Засоби штучного інтелекту: навч. посібник*. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2014. 204 с.
3. Нікольський Ю. В. *Системи штучного інтелекту: навч. посібник*. Львів: Магнолія-2006, 2013. 279 с.
4. Глибовець М. М., Олецький О.В. *Штучний інтелект*. Київ: Києво-Могилянська академія, 2002. 364 с.
5. Нікольський Ю. В., Пасічник В. В., Щербина Ю. М. *Системи штучного інтелекту: навч. посіб.* Львів: Магнолія-2006, 2013. 279 с.
6. What is a Neural Network? AWS. URL: <https://aws.amazon.com/what-is/neural-network/>
7. Simon J. D. Prince, *Understanding Deep Learning: Reinforcement learning*. 11 p.
8. Varun. Cosine similarity: How does it measure the similarity, Maths behind and usage in Python. *Medium*. 27.09.2020. URL: <https://towardsdatascience.com/cosine-similarity-how-does-it-measure-the-similarity-maths-behind-and-usage-in-python-50ad30aad7db>.
9. Prakash A. Understanding Cosine Similarity: A key concept in data science. *Medium*. 21.09.2023. URL: <https://medium.com/@arjunprakash027/understanding-cosine-similarity-a-key-concept-in-data-science-72a0fcc57599>.

10. Getting to Know Visual Studio. *Visual Studio*. URL: <https://visualstudio.microsoft.com/thank-you-downloading-visual-studio/?sku=Community&channel=Release&version=VS2022&source=VSLandingPage&cid=2030&passive=false>.

11. Marrs, T. JSON at Work: Practical Data Integration for the Web: Core JSON. 8 p.

12. Gough, J., Bryant, D., Auburn, M. Mastering API Architecture: Design, Operate, and Evolve API-Based Systems.

13. Astistova, T. I., Sedlyar, A. O. (2024). AItechnology in the creation of a tool for assessing the originality of texts. *Proceedings of the VIII International Scientific MSIE-2024*. Kyiv: KNUTD. P. 280–281.

10. Getting to Know Visual Studio. *Visual Studio*. URL: <https://visualstudio.microsoft.com/thank-you-downloading-visual-studio/?sku=Community&channel=Release&version=VS2022&source=VSLandingPage&cid=2030&passive=false>.

11. Marrs T. JSON at Work: Practical Data Integration for the Web: Core JSON. 8 p.

12. Gough J., Bryant D., Auburn M. Mastering API Architecture: Design, Operate, and Evolve API-Based Systems.

13. Astistova T. I., Sedlyar A. O. AItechnology in the creation of a tool for assessing the originality of texts. *VIII Міжнародна науково-практична конференція MSIE-2024*. К.: КНУТД, 2024. С. 280–281.

**ASTISTOVA TETYANA**

*Candidate of Technical Science, Associate Professor,  
Department of Computer Sciences,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine*  
<https://orcid.org/0000-0002-8452-4797>  
Scopus Author ID: 6506601603  
E-mail: [astistova@ukr.net](mailto:astistova@ukr.net)

**SEDLIAR ANDRII**

*Student  
Department of Computer Sciences,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine*  
<https://orcid.org/0009-0006-6815-2950>  
E-mail: [sedlyar.andrey.oleks@gmail.com](mailto:sedlyar.andrey.oleks@gmail.com)

**ASTISTOVA T. I., SEDLIAR A. O.**

*Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine*

**DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR EVALUATION OF OF TEXT ORIGINALITY**

**Objective.** *Develop software that combines standard methods and the use of artificial intelligence technologies to evaluate the originality of the text when writing scientific papers.*

**Methods.** *The development of the software was based on theoretical and experimental studies used to analyze the methods of text recognition generated by artificial intelligence, the selection and analysis of a neural network to identify patterns and corresponding patterns in human and artificial intelligence text writing and the integration of this model into the software. to check the text for originality, the implementation of text analysis technologies.*

**Results.** *The main results of the work can be divided into three interrelated aspects: analytical, design, and practical, each of which made a significant contribution to the achievement of the goal. The research resulted in a thorough analysis of the subject area, the concept of artificial intelligence, its architecture, the functioning of neural networks and their application to text analysis, the technical characteristics and capabilities of modern AI models, as well as aspects of their integration into the text review process, the issues of academic integrity, including the definition of plagiarism, its types and cultural peculiarities of perception of this phenomenon in the processes of education and research, the theoretical basis for the development of a tool that is able to take into account both technical and ethical aspects.*

*The structure of the program, its algorithms, methods of integration with the API for text analysis and data storage format are considered in detail, and a similarity algorithm is developed, which became the basis for identifying the similarity of texts. This allowed us to create a clear and logical product architecture that ensures its functionality and efficiency.*

**Scientific novelty.** *An original solution is proposed in the form of an integrated system that combines classical methods of checking text for originality with the recognition of texts created by artificial intelligence,*

which is an important step towards proving academic integrity in a context where artificial intelligence will be used more and more widely in many areas of our lives.

**Practical value.** The software for text processing technologies is a comprehensive study aimed at developing a software product capable of effectively detecting plagiarism and analyzing texts created with the help of artificial intelligence. The developed tool opens up new opportunities for combating academic dishonesty, facilitates the automation of routine processes, and supports ethical standards in the field of education and science.

**Keywords:** software; API; artificial intelligence; neural network; patterns; JSON; C#; Visual Studio; plagiarism; SQLite.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.5.4>

УДК 678.65.  
98.41

БУЛГАКОВ Є. С., РОЗВОРА Л. В., САВЧЕНКО Б. М.,  
СОВА Н. В., СЛЄПЦОВ О. О.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЗАСТОСУВАННЯ МІНЕРАЛЬНОГО НАПОВНЮВАЧА У ВИРОБНИЦТВІ ПЛІВКИ З ПОЛІЕТИЛЕНУ

**Мета дослідження.** Метою даної статті є техніко-економічна оцінка впливу використання карбонату кальцію в якості наповнювача у поліетиленових плівках.

**Методи дослідження.** Густина плівкових зразків визначали за ISO 1183 методом гідростатичного зважування. Об'ємну та масову собівартість плівкової композиції визначали за розрахунковими формулами. Міцність та відносне видовження при розриві для досліджуваних зразків визначали за ISO 527.

**Результати.** Проаналізовано способи модифікації полімерних матеріалів шляхом введення в них різних добавок, що здатні регулювати властивості кінцевих виробів. Розглянуто можливості застосування карбонату кальцію як модифікатора властивостей поліетиленових плівок, зокрема регулювання густин кінцевих виробів та зниження собівартості. Отримано плівки з поліетилену низької густини марки Sabic LDPE HP2023J з різним вмістом наповнювача карбонату кальцію з використанням концентрату марки Omyalene 2021 виробництва Omya AG, що містить 70% наповнювача. Коефіцієнт роздуву плівки складав 2,5, а коефіцієнтом повздовжнього витягування – 4,5. Визначено густина отриманих плівок розрахунковим способом за методом адитивності та методом вимірювання. Встановлено, що введення карбонату кальцію до 16% зумовлює зниження густини плівки на 8,6%, що ймовірно зумовлено кавітаційним ефектом. Об'ємна собівартість композиції, що містить 40% наповнювача на 2,5% нижче за вартість вихідного поліетилену низької густини, що дозволяє ефективно застосовувати карбонат кальцію як наповнювач для здешевлення плівкових композицій. Введення до 30% наповнювача дозволяє зберегти рівень механічних властивостей, придатний для застосування поліетиленових плівок, хоча густина плівки зростає при цьому.

**Наукова новизна.** Встановлено вплив наповнювача на основі карбонату кальцію на механічні властивості плівки з поліетилену низької густини.

**Практична значимість.** Встановлено межі раціонального вмісту наповнювача при застосуванні розрахунку вартості до одиниці об'єму готової продукції.

**Ключові слова:** поліетилен низької густини; карбонат кальцію; густина; плівка; собівартість.

**Вступ.** Полімери є найбільш масовими матеріалами сучасності. Необхідність у функціональній модифікації полімерів призвела до того, що вони досить рідко використовуються у чистому вигляді і зазвичай є складовими продукту модифікації – полімерних матеріалів або пластиків. Найпоширенішими шляхами модифікації є створення сумішей з гомогенними та гетерогенними матеріалами, котрі відомі під назвами полімерні суміші та полімерні композити [1]. Полімерні композити утворюються з полімерної матриці або зв'язуючого та наповнювача, котрий має відмінну хімічну будову (гетерогенність) та чітку межу розподілу фаз [2]. Наповнювачі в полімерних композитах – це матеріали, що мають визначену форму та розмір часток та визначені характеристики їх статистичного розподілу, а також певні характеристики поверхні. За механізмом впливу наповнювачі можуть бути активними та пасивними, але найбільш поширеними є саме пасивні наповнювачі або скорочено – наповнювачі. Застосування наповнювачів у складі полімерних матеріалів дозволяє модифікувати численні корисні властивості, зокрема колір поверхні, густина, реологічні властивості, собівартість одиниці маси та об'єму та багато інших [3].

Найбільше застосування як наповнювачі для полімерних матеріалів знайшли матеріали природнього та штучного походження на основі карбонату кальцію. Наповнювачі на основі карбонату кальцію промислово одержуються двома шляхами: переробкою сировини природнього походження з вмістом карбонату кальцію або хімічним перетворенням сировини з виділення карбонату кальцію. Найбільше промислове значення мають мінерали, що містять карбонат кальцію – мрамур, кальцит, вапняк, крейда. В залежності від геологічного походження структура мінералів суттєво відмінна, але в загальному, структура карбонату кальцію може мати виражену кристалічну або аморфну складову. Мінеральне походження сировини та технологія подрібнення визначають основні якісні характеристики наповнювача, такі як гранулометричний склад, ступінь білизни, питома поверхня та форма часток, сипучість та насипна густина. Наповнювачі, призначені для застосування у галузі полімерів, зазвичай проходять поверхневу обробку хімічного або фізичного характеру. Вона як правило здійснюється під час подрібнення, або як окрема стадія процесу виробництва наповнювача. Для поверхневої обробки найчастіше використовують стеаринову кислоту, органічні сполуки кремнію – силани та сполуки цирконієвої і титанової кислоти та мінеральні олії. Поверхнева обробка наповнювача покращує змочування часток полімерним розплавом та покращує адгезію на межі контакту [4, 5].

Останнім часом на ринку з'являються карбонати кальцію, оброблені і іншими органічними сполуками, такі як Omyafiber, Omyamax, Omya Smartfill, та ін. від флагману на ринку карбонату кальцію, компанії Omya. Нові типи обробки карбонату кальцію необхідні для покращення розподілу наповнювача в полімерній матриці, але самі речовини, що використовуються для обробки, приховуються компанією як комерційна таємниця [6].

Карбонат кальцію може виконувати цілу низку корисних функцій в якості наповнювача: він може бути пігментом, модифікатором реології, матуючою добавкою, антиблокуючим агентом для плівок, нейтральним наповнювачем для біорозкладних пластиків, доданком для підвищення щільності, модифікатором розподілу інших наповнювачів або барвників, модифікатором механічних характеристик (підвищення модулю пружності, зменшення розтріскування) тощо, але в більшості випадків, українські виробники полімерних виробів додають карбонат кальцію з єдиною метою – здешевлення кінцевого виробу.

Далі у статті буде продемонстровано, що карбонат кальцію далеко не завжди здешевлює кінцевий виріб. Буде окремо розібрано сфери застосування карбонату кальцію. Але, спершу, введемо поняття об'ємної вартості полімерів.

Постачальники полімерних матеріалів та наповнювачів до них, завжди виставляють ціни на свої матеріали у гривнях (або іншій валюті) за одиницю ваги. Так само за вагою ведуться усі типи обліку в аналітичних компаніях, що займаються аналізом ринку та всередині самих компаній, що переробляють полімери. Собівартість у внутрішньому обліку на підприємствах також рахується у гривнях за кілограм готової продукції. Проте ніхто, фактично, не враховує об'ємну вартість сировини, яку вони закупають. Хоча цей параметр є набагато важливішим для кінцевого споживача. Ми купуємо плівку або шпалери у гривнях за метр квадратний, пакети-майка в магазинах або вазони для квітів – у гривнях за одиницю, труби або шланги для поливу – у гривнях за метри довжини. Практично жоден полімерний виріб не доходить до кінцевого споживача у гривнях за кілограм. Наприклад, в умовах жорсткого та висококонкурентного українського ринку, якому притаманні риси споживчого тероризму, українські виробники вимушені давати знижки мережам роздрібної торгівлі, котрих не так багато, задля збереження своєї долі на ринку та об'єму виробництва для підтримання самого підприємства. Самі знижки розраховуються в якості відсотків від ціни кінцевого виробу (знову ж, ці ціни вказуються у грн/од., грн/м, грн/м<sup>2</sup>). Необхідність зниження цін штовхає підприємців до зниження собівартості виробів. З огляду на собівартість свого

продукту у грн/кг (як ми сказали раніше, вся сировина для переробки доходить до підприємця у грн/кг), підприємець «наочно» бачить найбільш простий та очевидний спосіб економії: додати більше дешевого компоненту своєї суміші та менше дорогого компоненту. Як правило, дешевим компонентом є карбонат кальцію, а дорогим – сам базовий полімер. Проте, вплив доданого карбонату кальцію на щільність кінцевого виробу залишається «підводним каменем», на який зважають далеко не всі. А як раз зміна щільності виробу є критичним фактором цього розрахунку, адже зниження масової собівартості виробу за рахунок введення карбонату кальцію зовсім нелінійно знижує об'ємну собівартість того ж виробу.

**Постановка завдання.** Метою даної статті є техніко-економічна оцінка впливу використання карбонату кальцію в якості наповнювача у поліетиленових плівках.

**Вихідні дані.** Для досліджень було використано поліетилен низької густини марки Sabic LDPE HP2023J, концентрат наповнювача марки Omyalene 2021 виробництва Omya AG, що містить 70% наповнювача.

Плівкові зразки з різним вмістом наповнювача було одержано на лабораторній лінії видування плівок «SCM20 film blowing machine» виробництва «LJ Machine», КНР. Технологічні параметри виготовлення плівок відповідали типовим умовам переробки в промислових умовах. Коефіцієнт роздуву 2,5. Коефіцієнт повздовжнього витягування 4,5. Температурний профіль екструдера 170–200–195°C, кільцева голівка – 200–205°C. Плівкові зразки у вигляді рукава використовувалися для визначення густини методом гідростатичного зважування на вагах Radwag AS 220.R2. Міцність при розриві та відносне видовження дослідних зразків визначали на розривні машині P50 за ISO 527.

Для розрахунку собівартості композиції сировини у поліетиленовій плівці було використано усереднені ціни за типом сировини на вибрані досліджувані матеріали у об'ємній та масовій вартості, що представлені в табл.1.

Таблиця 1

Ціни полімеру та добавки у 2024 році

Полімер	Ціна, грн/кг	Щільність, кг/дм <sup>3</sup>	Ціна, грн/дм <sup>3</sup>
ПЕ низької густини	59	0,92	54,28
70% концентрат наповнювача на основі карбонату кальцію	32	2,01	64,32

Розрахунок собівартості композиції проводили за наступними формулами [7]:

Масова собівартість  $C_m$ :

$$C_m = \sum_{i=1}^n N_i * C_i / M,$$

де  $n$  – кількість матеріалів;  $N_i$  – витрати матеріалу  $i$ -го найменування;  $C_i$  – ціна матеріалу  $i$ -го найменування;  $M$  – маса отриманого продукту.

Об'ємна собівартість  $C_{об}$ :

$$C_{об} = \sum_{i=1}^n N_i * C_i / \sum_{i=1}^n N_i / \rho_i,$$

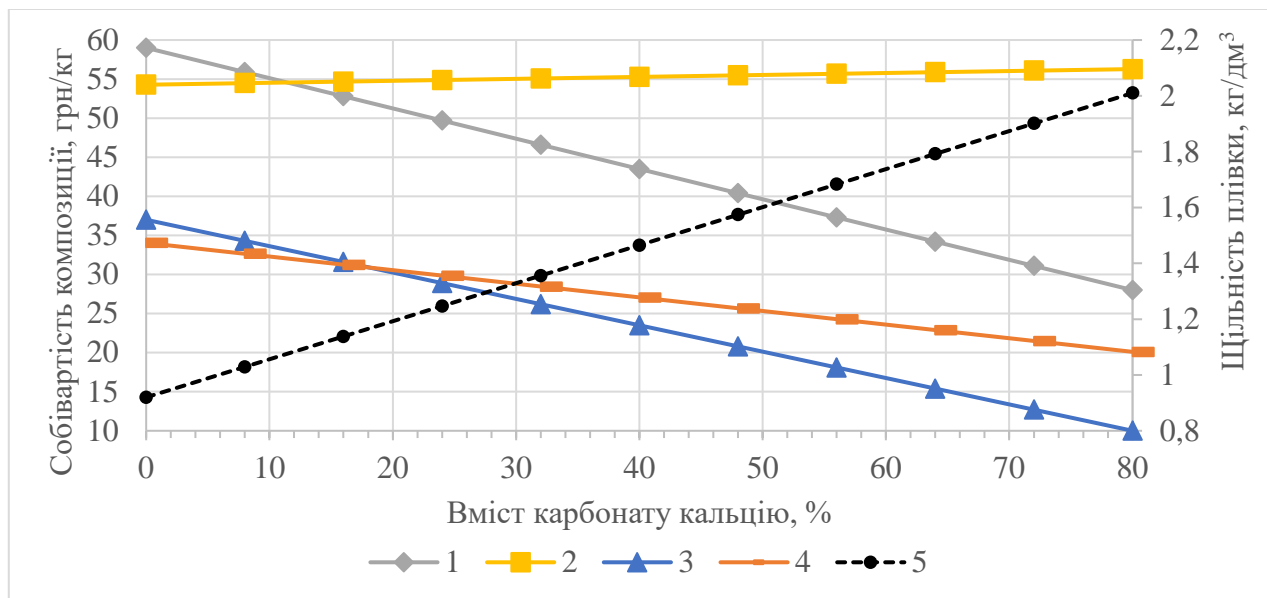
де  $n$  – кількість матеріалів;  $N_i$  – витрати матеріалу  $i$ -го найменування;  $C_i$  – ціна матеріалу  $i$ -го найменування;  $\rho_i$  – щільність матеріалу  $i$ -го найменування.

Теоретичний розрахунок щільності композиції проводили за наступною формулою:

$$\rho_k = \sum_{i=1}^n C_i * \rho_i,$$

де  $n$  – кількість компонентів;  $C_i$  – масова частка компоненту  $i$ -го найменування;  $\rho_i$  – щільність компоненту  $i$ -го найменування.

**Результати дослідження.** Розглянемо використання концентрату наповнювача на основі карбонату кальцію у плівках, виготовлених методом роздуву для виробництва пакетів типу майка. Так, за формулами, наведеними вище, проведемо розрахунок об'ємної та масової собівартості композиції для плівки, виготовленої з поліетилену низької густини за цінами 2024 року та зобразимо отримані результати графічно (рис. 1).



Легенда: 1 – масова собівартість композиції 2024, грн/кг; 2 – об'ємна собівартість композиції 2024, грн/дм<sup>3</sup>; 3 – масова собівартість композиції 2020, грн/кг; 4 – об'ємна собівартість композиції 2020, грн/дм<sup>3</sup>; 5 – розрахункова щільність плівки, кг/дм<sup>3</sup>.

**Рис. 1. Залежність розрахункової об'ємної та масової собівартості композиції для плівки, виготовленої з поліетилену низької густини від вмісту карбонату кальцію**

Розрахункова масова собівартість такої композиції (1) закономірно знижується. Але зміна об'ємної собівартості (2) виглядає вкрай неочевидною, особливо враховуючи те, що типове введення наповнювача на основі карбонату кальцію українського виробника поліетиленових пакетів складає цілих 40%. Як можна бачити з графіку, об'ємна собівартість композиції є вищою за вартість чистого поліетилену.

Виникає цілком закономірне запитання: навіщо виробники плівки це роблять і невже ніхто раніше не помітив, що таких підхід не призводить до економії? Відповідь на це питання полягає у ринкових умовах, що наразі створено на ринку: карбонат кальцію порівняно дешевий продукт, його вартість у, наприклад, Туреччині, – основній країні-виробнику дрібнодисперсного карбонату кальцію, що постачається в Україну, може складати 40–45 доларів США за 1000 кг.

Величезний вплив на вартість карбонату кальцію має вартість логістики. Після повномасштабної російської агресії на початку 2022 року, дешеві морські логістичні шляхи закрилися і вартість карбонату кальцію суттєво підвищилась, в той час як ціни на полімери почали знижуватись. Таким чином, баланс цін, що тримався роками, суттєво змінився. Для порівняння, наведемо залежність тих самих розрахунків, але з цінами у 2020 році (де ціна на поліетилен складала близько 0,9 дол. США/кг, а карбонат кальцію – 0,5 дол. США/кг):

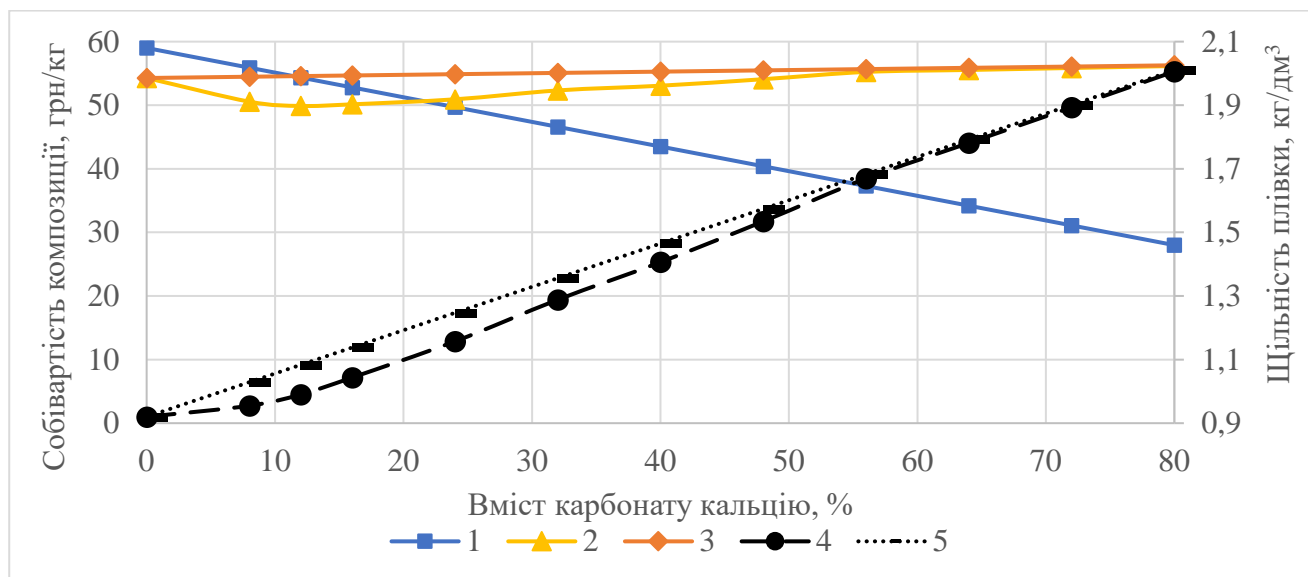
Із огляду на рис. 1, видно, що до зміни балансу цін, введення карбонату кальцію до поліетиленових плівок працювало більш закономірно: масова собівартість (3) лінійно і пропорційно знижувалась, об'ємна собівартість (4) також знижувалась, але не так стрімко.

Така ситуація на ринку зберігалась десятиріччями, що створило стійкий стереотип щодо економічної ефективності використання карбонату кальцію у поліетиленовій плівці.

Проте з таких прямих розрахунків є і виключення. По-перше, прямий розрахунок щільності не буде коректним у випадку орієнтації виробів. Відомо, що біаксіально-орієнтовані плівки при введенні карбонату кальцію практично не змінюють своєї щільності, а інколи їх щільність навіть знижується до  $0,7-0,75 \text{ кг/дм}^3$ , що значно менше за щільність поліпропілену ( $0,93 \text{ кг/дм}^3$ ) завдяки утворенню кавітаційних порожнин [8–11]. Утворення порожнин спостерігається і при одержанні рукавних плівок, хоча вона зазнає значно менш інтенсивної орієнтації під час формування у розплаві.

Нами було проведено серію дослідів із вимірювання щільності плівки, виготовленої з поліетилену низької густини з різним вмістом наповнювача на основі карбонату кальцію. Для плівки з поперечним роздувом у розмірі 2,5 крат та повздовжньою витяжкою 4,5 крат (типова кратність витяжки плівки, виготовленої методом роздуву) густина спочатку знижується на 8,6% (при введенні карбонату кальцію до 16%), після чого поступово зростає, хоча при вмісті наповнювача 80% все ж таки на 0,2% нижче – розрахованої. Така відмінність у значення густини зумовлена ймовірно ефектом кавітації – утворення мікропор внаслідок витягування плівки. Тому включимо в розрахунки виміряну густину плівки для врахування ефекту кавітації.

Для більшої наочності, знову ж наведемо залежність зміни об'ємної та масової собівартості композиції для плівки, виготовленої з поліетилену низької щільності залежно від ступеня введення наповнювача карбонату кальцію за цінами 2024 року з урахуванням кавітаційного ефекту у вигляді графіку та порівняємо їх із розрахунковими даними без урахування кавітацій (рис. 2).



Легенда: 1 – масова собівартість композиції 2024, грн/кг; 2 – об'ємна собівартість композиції (за виміряною щільністю) 2024, грн/дм<sup>3</sup>; 3 – розрахункова об'ємна собівартість композиції (за розрахунковою щільністю) 2024, грн/дм<sup>3</sup>; 4 – виміряна щільність плівки, кг/дм<sup>3</sup>; 5 – розрахункова щільність плівки, кг/дм<sup>3</sup>.

Рис. 2. Залежність об'ємної та масової собівартості композиції для плівки, виготовленої з поліетилену низької густини залежно від вмісту карбонату кальцію за цінами 2024 року

Як можна бачити з графіку, виміряні значення густини плівки, що містить наповнювач відрізняються від розрахованих. При вмісті наповнювача 16% виміряна густина нижча за

розраховану на 8,6%. Завдяки цьому собівартість плівкової композиції знизилась на 8,3%. Відмінність вимірної густини від розрахованої ймовірно пов'язана з негомogenous приляганням часток наповнювача до полімерної матриці. Виявлена відмінність густини позитивно впливає на техніко-економічні показники виробництва. При вмісті наповнювача 40%, об'ємна собівартість такої композиції на 2,5% нижче за вартість вихідного поліетилену.

Оцінка міцності при розриві та відносного видовження для плівкових зразків є важливим аспектом при експлуатації готових виробів. В табл. 2 наведено механічні властивості зразків плівок з різним вмістом наповнювача, виготовлених методом екструзії з роздувом.

Таблиця 2

**Механічні властивості зразків плівок та сумішей**

№	Вміст наповнювача, % мас	Щільність, кг/дм <sup>3</sup>	Видовження при розриві, %	Міцність при розриві, МПа
1	0	0,92	950	26
2	8	0,95	1050	26
3	16	1,04	750	24
4	24	1,16	560	19
5	32	1,29	480	17
6	40	1,41	430	13
7	48	1,57	360	8
8	56	1,68	170	4
9	64	1,79	-	-
10	72	1,90	-	-
11	80	2,01	-	-

Зразки з вмістом наповнювача понад 70% виявилися технологічно непридатними для виготовлення на лабораторній установці, внаслідок втрати технологічних властивостей. Прийнятний для подальшого застосування рівень механічних властивостей зберігається при вмісті наповнювача від 0 до 50%. При вмісті наповнювача до 30% спостерігається збереження рівня механічних властивостей, придатного для більшості застосувань поліетиленових плівок.

**Висновки.** Розглянуто вплив введення карбонату кальцію на собівартість плівкових композицій на основі поліетилену низької густину. Встановлено, що введення наповнювача карбонату кальцію у поліетиленову плівку в кількості 15% приводить до зниження об'ємної собівартості композиції на 8%. При введенні 40% наповнювача вдається отримати зниження об'ємної собівартості плівкової композиції на 2,5%, що зумовлено ймовірно явищем кавітаційного ефекту при орієнтації плівки. Введення наповнювача понад 40% призводить до зростання об'ємної собівартості композиції вище за вартість вихідної первинної сировини і застосування наповнювача є недоцільним.

Введення високоякісного наповнювача дозволяє забезпечити прийнятні механічні властивості плівок на основі поліетилену до вмісту наповнювача 30%.

Об'ємна собівартість композиції майже не залежить від вмісту наповнювача. Зниження собівартості за рахунок ймовірного кавітаційного ефекту має більш вагомий внесок в економічний ефект, ніж введення наповнювача. Застосування наповнювача на основі карбонату кальцію є доцільним при реалізації готової продукції на вагу, а не у кількісному вимірі. Дані розрахунки сильно залежать від співвідношення цін на первинну сировину та концентрат наповнювача на локальному ринку України. Розрахунки собівартості, проведені в цінах 2020 року ілюструють іншу динаміку впливу наповнювача на собівартість.

На ринку України користується популярністю концентрат наповнювача на основі вторинної полімерної сировини, що потребує окремих досліджень техніко-економічних показників плівкових композицій.

### References

1. Graziano, A., Jaffer, S., Sain, M. (2019). Review on modification strategies of polyethylene/polypropylene immiscible thermoplastic polymer blends for enhancing their mechanical behavior. *Journal of elastomers & plastics*, No. 51 (4), P. 291–336.
2. Parida, S. K. et al. (2024). Introduction of Polymers and Polymer Composites: Basic Fundamentals." *Polymer Composites: Fundamentals and Applications. Singapore: Springer Nature Singapore*, 2024. P. 1–37.
3. Moharana, S., Sahu, B. B., Nayak, A. K., Tiwari, S. K. (eds.) (2024). *Polymer Composites: Fundamentals and Applications*. Springer Nature.
4. Qiu, J., Lyu, J. W., Yang, J. L., Cui, K. B., Liu, H. Z., Wang, G. F., Liu, X. (2024). Review on Preparation, Modification and Application of Nano-Calcium Carbonate. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2400097.
5. Zakirova, L. Y., Galimzyanova, R. Y., Khakimullin, Y. N. (2024). The Effect of Calcium Carbonate on the Properties of Sealing Compositions Based on Low-Molecular-Weight Polyethylene. *Polymer Science, Series D*, No. 17 (2), P. 311–314.
6. Omyafiber. URL: <https://www.omya.com/en/products/polymers/omyafiber>.
7. Прокопівний С. Ф. (2001). *Економіка підприємства: підручник* [Enterprise economics: a textbook]. Kyiv: KNEU [in Ukrainian].
8. Mobley, G., Boutelle, T., Garrett, S., Joiner, L. (2002). Effect of calcium carbonate on the abrasive wear of melt processing equipment in filled systems. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2002, P. 271–277.
9. Yuksekkalayci, C., Yilmazer, U., Orbey, N. (1999). Effects of nucleating agent and processing conditions on the mechanical, thermal, and optical properties of biaxially oriented polypropylene films. *Polymer Engineering & Science*, 1999, P. 1216–1222.
10. Brunner, M. (2017). Calcium Carbonate CaCO<sub>3</sub> as cavitation and voiding agents in biaxially oriented films. Edana.
11. Zgheib, N., Seif, S., El Hajj, N. (2019). PP-CBW/m-LLDPE/micro-CaCO<sub>3</sub> composite films manufactured from bumper waste by blown film extrusion. *MATEC Web of Conferences*, 2019, 03001.

### Література

1. Graziano A., Jaffer S., Sain M. Review on modification strategies of polyethylene/polypropylene immiscible thermoplastic polymer blends for enhancing their mechanical behavior. *Journal of elastomers & plastics*. 2019. No. 51 (4). P. 291–336.
2. Parida, S. K. et al. Introduction of Polymers and Polymer Composites: Basic Fundamentals. *Polymer Composites: Fundamentals and Applications*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. P. 1–37.
3. Moharana S., Sahu B. B., Nayak A. K., Tiwari S. K. (eds.) *Polymer Composites: Fundamentals and Applications*. Springer Nature, 2024.
4. Qiu J., Lyu J. W., Yang J. L., Cui K. B., Liu H. Z., Wang G. F., Liu X. Review on Preparation, Modification and Application of Nano-Calcium Carbonate. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2024. 2400097.
5. Zakirova L. Y., Galimzyanova R. Y., Khakimullin Y. N. The Effect of Calcium Carbonate on the Properties of Sealing Compositions Based on Low-Molecular-Weight Polyethylene. *Polymer Science, Series D*. 2024. No. 17 (2). P. 311–314.
6. Omyafiber. URL: <https://www.omya.com/en/products/polymers/omyafiber>.
7. Прокопівний С. Ф. *Економіка підприємства: підручник*. Київ: КНЕУ, 2001.
8. Mobley G., Boutelle T., Garrett S., Joiner L. Effect of calcium carbonate on the abrasive wear of melt processing equipment in filled systems. *Journal of Vinyl and Additive Technology*. 2002. P. 271–277.
9. Yuksekkalayci C., Yilmazer U., Orbey N. Effects of nucleating agent and processing conditions on the mechanical, thermal, and optical properties of biaxially oriented polypropylene films. *Polymer Engineering & Science*. 1999. P. 1216–1222.
10. Brunner M. Calcium Carbonate CaCO<sub>3</sub> as cavitation and voiding agents in biaxially oriented films. Edana, 2017.
11. Zgheib N., Seif S., El Hajj N. PP-CBW/m-LLDPE/micro-CaCO<sub>3</sub> composite films manufactured from bumper waste by blown film extrusion. *MATEC Web of Conferences*, 2019, 03001.

**BULHAKOV YEVHENII**

Postgraduate Student,  
Department of Chemical Technologies and  
Resource Saving, Kyiv National University  
of Technologies and Design, Ukraine  
E-mail: [Yevhenii.bulhakov97@gmail.com](mailto:Yevhenii.bulhakov97@gmail.com)

**SAVCHENKO BOHDAN**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Department of Chemical Technologies and  
Resource Saving, Kyiv National University  
of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-8636-5734>  
Scopus Author ID: 56685269800  
E-mail: [1079@ukr.net](mailto:1079@ukr.net)

**ROZVORA LYUBOMIR**

Postgraduate Student,  
Department of Chemical Technologies and  
Resource Saving, Kyiv National University  
of Technologies and Design, Ukraine  
E-mail: [lew.9.bv@gmail.com](mailto:lew.9.bv@gmail.com)

**SOVA NADIYA**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Department of Chemical Technologies and  
Resource Saving, Kyiv National University  
of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-3550-6135>  
Scopus Author ID: 56685569600  
E-mail: [djanc@ukr.net](mailto:djanc@ukr.net)

**SLIEPTSOV ALEXANDR**

PhD, Assistant,  
Department of Chemical Technologies and  
Resource Saving, Kyiv National University  
of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-0608-1855>  
Scopus Author ID: 57189215952  
E-mail: [slyepcov.oo@knu.edu.ua](mailto:slyepcov.oo@knu.edu.ua)

**BULHAKOV Y. S., ROZVORA L. V., SAVCHENKO B. M., SOVA N. V., SLIEPTSOV A. O.**  
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**TECHNICAL AND ECONOMIC EVALUATION OF MINERAL FILLER APPLICATION  
IN POLYETHYLENE FILM PRODUCTION**

**Purpose.** The purpose of this article is to make assessment of the raw material composition cost for polyethylene film with calcium carbonate base filler.

**Methodology.** The density of the film samples was determined according to ISO 1183 by hydrostatic weighing. The volume and mass cost of the film composition was determined by the calculation formulas. Blown film with different filler content was obtained on laboratory extrusion equipment. The strength and relative elongation at break for the tested samples were determined according to ISO 527.

**Findings.** The methods of modifying polymeric materials by introducing various additives that can regulate the properties of final products are analyzed. The possibilities of using calcium carbonate as a modifier of the properties of polyethylene films, in particular, to regulate the density of final products and reduce their cost, are considered. Low-density polyethylene films of the Sabic LDPE HP2023J brand with different content of calcium carbonate filler were obtained using Omya AG's Omyalene 2021 concentrate containing 70% filler. The film blow-up coefficient was 2.5, and the longitudinal stretching coefficient was 4.5. The density of the obtained films was calculated by the additive method and the measured by hydrostatic weighting method. It was found that calcium carbonate filler content 16% causes a decrease in film density by 8.6% comparing to calculated value, which is probably due to the cavitation or interface effect. The volume cost of the composition containing 40% of the filler is 2.5% lower than the cost of the original low-density polyethylene, which makes it possible to effectively use calcium carbonate as a filler to reduce the cost of film compositions. The introduction of up to 30% of filler allows maintaining the level of mechanical properties suitable for the industrial use of polyethylene films, with corresponding density increases.

**Originality.** The effect of a filler based on calcium carbonate on the mechanical properties of a low-density polyethylene film was determined.

**Practical value.** The limits of the rational content of the filler when applying the cost calculation to the unit volume of the finished product are established.

**Keywords:** low-density polyethylene; calcium carbonate; density; film composition cost.

УДК 697.132

<sup>1,2</sup>ДЕШКО В. І., <sup>1,3</sup>БІЛОУС І. Ю., <sup>1</sup>СУХОДУБ І. О.,  
<sup>1</sup>ГЕТМАНЧУК Г. О., <sup>1</sup>КРАМАРЕНКО С. О.

<sup>1</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

<sup>2</sup> Інститут технічної теплофізики НАН України, Україна

<sup>3</sup> Інститут загальної енергетики НАН України, Україна

## АНАЛІЗ ЗМІНИ ЗОВНІШНЬОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ ЗІ СПЕЦІАЛЬНИМ ФОКУСОМ НА МОЖЛИВИХ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ

**Метою** статті є аналіз даних температури зовнішнього середовища з кліматичних баз даних України та *Meteonorm* з використанням історичних, поточних та прогнозованих даних для оцінки потенціалу використання відновлювальних джерел енергії.

**Методика** включає використання методів синтезу та аналізу кліматичних даних.

**Результати** включають аналіз температур зовнішнього середовища, як кліматичних даних, що мають найбільший вплив на енергоефективність будівель та забезпечення комфортності. Особлива увага приділена аналізу екстремальних погодних умов, таким як: хвилі спеки, тропічні ночі, морозні дні та холодні дні.

В статті проведено порівняння нормативних та кліматичних даних за історичний та поточний періоди, а також майбутніх сценаріїв розвитку зміни температури зовнішнього середовища під впливом антропогенних факторів. Встановлено, що з кожним наступним сценарієм RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 відбуватиметься швидше зростання середньорічної температура зовнішнього середовища. У Києві до 2100 року температура зовнішнього середовища згідно RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 зростає на 1,2°C, 3,1°C, 5,8°C відповідно. У Одесі ріс температури до 2100 року відповідно RCP 2.6 становитиме 1,1°C, за RCP 4.5 – 2,9°C, за RCP 8.5 – 5,3°C.

Результати також збільшення кількості теплових хвиль і тропічних ночей, та скорочення кількості морозних та холодних днів.

**Наукова новизна** полягає у обґрунтуванні використання міжнародних кліматичних баз даних для проектування систем енергозабезпечення будівель з використанням відновлювальних джерел енергії в контексті змін клімату та діючої нормативної кліматології України.

**Практична значимість** результатів дослідження дозволяє оцінити відмінність кліматичних різних регіонів України, їх зміни в контексті історичного, поточного та майбутніх змін клімату. Також, в статті проведено аналіз екстремальних погодних даних, що є актуальним в контексті проектування інженерних систем та джерел будівель.

**Ключові слова:** кліматичні дані; *Meteonorm*; температура зовнішнього середовища; екстремальні погодні умови; енергоефективність.

**Вступ.** В Україні на національному рівні діє стандарт ДСТУ 9190:2022 [1], який установлює вимоги до методу розрахунку показників енергоефективності будівель під час проектування, нового будівництва, реконструкції, капітального ремонту, зокрема з метою термомодернізування. В даному стандарті кліматичні параметри визначені на підставі даних ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія [2]. Середньомісячні кліматичні параметри наведені ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 розраховано на основі інформації метеорологічних спостережень 53 метеорологічних станцій за період 1961–2005 років. Нормативної погодинної кліматології в Україні немає. Середньомісячних кліматичних даних достатньо при стаціонарному та квазістаціонарному методах розрахунку, проте для динамічного визначення енергетичних характеристик будівель необхідним є використання погодинних кліматичних даних. Особливо в умовах моделювання відновлювальних джерел енергії для енергозабезпечення будівель.

Дане дослідження присвячене аналізу температура повітря за сухим термометром (°C) за історичний та поточний періоди, а також майбутніми сценаріями розвитку погодних змін

під впливом антропогенних факторів. З глобальної кліматичної бази даних Meteororm [3, 4] були отримані середньомісячні кліматичні дані за історичний (1981–1990 роки) та поточний періоди. Особлива увага приділена аналізу екстремальних погодних умов в Україні, а саме: хвилі спеки, тропічні ночі, морозні дні та холодні дні.

В огляді було більш детально опрацьовано помісячні дані для міст Києва та Луганська – як представників I температурної зони Центральної та Східної України, Одеси та Ужгорода – як представників II температурної зони Південної та Західної України [5].

Аналіз кожного регіону території України є важливим також через введення військового стану, оскільки велика частина населення зі східних та південних регіонів перемістилась в центральні та західні регіони. Станом на грудень 2023 року в Україні налічувалося близько 3,7 мільйона ВПО, причому 80% з них були переміщені на термін понад рік [6]. Відповідно, актуальним є комфортне розміщення та тих територіях значної кількості людей. В той же час, на сході і півдні багато людей втратили житло і є актуальним і затребуваним розміщенням там тимчасового модульного житла з забезпеченням комфортних умов перебування. Згідно з вимогами до тимчасового житла для ВПО, встановленими Кабінетом Міністрів України, в тому числі і до швидкокомонтованих містечок, воно повинно бути обладнане функціонуючими інженерними системами будівлі, до яких відносяться системи електропостачання, опалення, вентиляції, водопостачання та водовідведення. Він також повинен забезпечувати температуру повітря в приміщенні в межах 18–25°C залежно від сезону експлуатації [7]. В умовах постійних обстрілів енергетичної системи України все більшої актуальності набуває розробка автономних систем енергозабезпечення будівель на основі відновлювальних джерел енергії.

**Постановка завдання.** Метою роботи є аналіз температура повітря за сухим термометром з різних кліматичних баз даних з використанням історичних, поточних та прогнозованих даних для оцінки потенціалу використання відновлювальних джерел енергії в різних регіонах України.

**Результати дослідження.**

**Аналіз помісячних значень за історичні, поточні періоди та нормативних значень.** На рис. 1 наведено гістограми помісячних змін температури зовнішнього середовища за поточний (2000–2019 роки) та історичний періоди отримані з глобальної кліматичної бази даних Meteororm [4], та відповідно ДСТУ 9190:2022 [1] (1961–2005 роки).

Часовий проміжок за який усереднювали кліматичні дані наведені в ДСТУ 9190:2022 [1] знаходиться між історичним та поточним періодами з бази даних Meteororm [4]. З рис. 1 видно, що для усіх міст помісячна температура зовнішнього середовища відповідно ДСТУ 9190:2022 [1] знаходиться між значеннями за історичний та поточний періоди з бази даних Meteororm [4]. Різниця помісячних змін температури зовнішнього середовища між даними за поточний період та даними наведеними в ДСТУ 9190:2022 [1] для міста Київ становить 0,3–1,6 °C, Одеси – 0,1–2,1 °C, Ужгорода – 0,4–1,5 °C, Луганська – 0,4–2,0 °C. Між даними за історичний період та даними наведеними в ДСТУ 9190:2022 [1] для міста Київ становить 0–0,9 °C, Одеси – 0–0,5°C, Ужгорода – 0–0,4°C, Луганська – 0,1–1,0 °C.

**Аналіз поточних, нормативних та майбутніх кліматичних даних.** Також в Meteororm [4] доступні до аналізу дані помісячних та погодинних кліматичних даних для трьох сценаріїв зміни клімату – RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5.

Сценарії майбутнього клімату базуються на сценаріях RCP (Representative Concentration Pathways), прийнятих Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату (МГЕЗК). Причиною прийняття цих сценаріїв є невизначеність щодо того, наскільки сильно зміниться клімат у майбутньому. Викиди CO<sub>2</sub> залежатимуть не лише від зростання споживання викопного палива через збільшення чисельності населення, але й від частки відновлюваних

джерел енергії та питомого енергоспоживання. Крім того, на баланс вуглекислого газу впливають вирубка лісів та збільшення площі орних земель [8]. Поглиблений аналіз кліматичних даних для різних сценаріїв зміни клімату проведено для двох міст-представників I та II кліматичних зон – Київ та Одеса, відповідно [2].

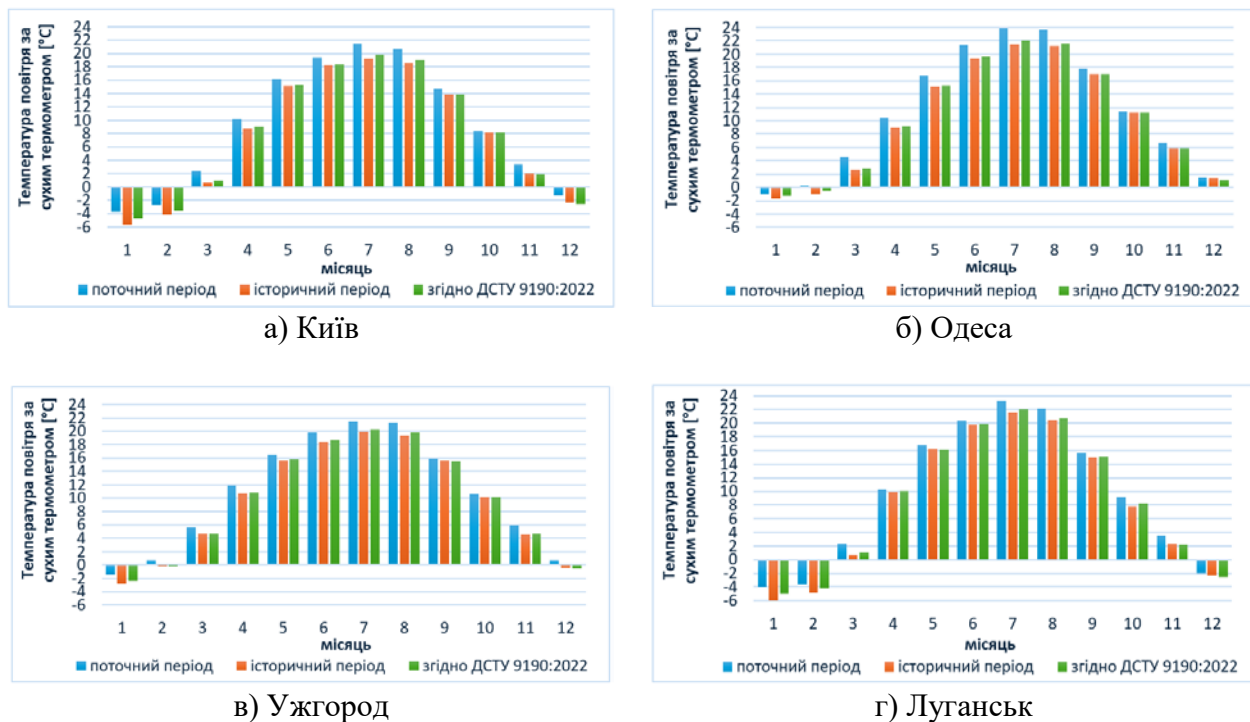
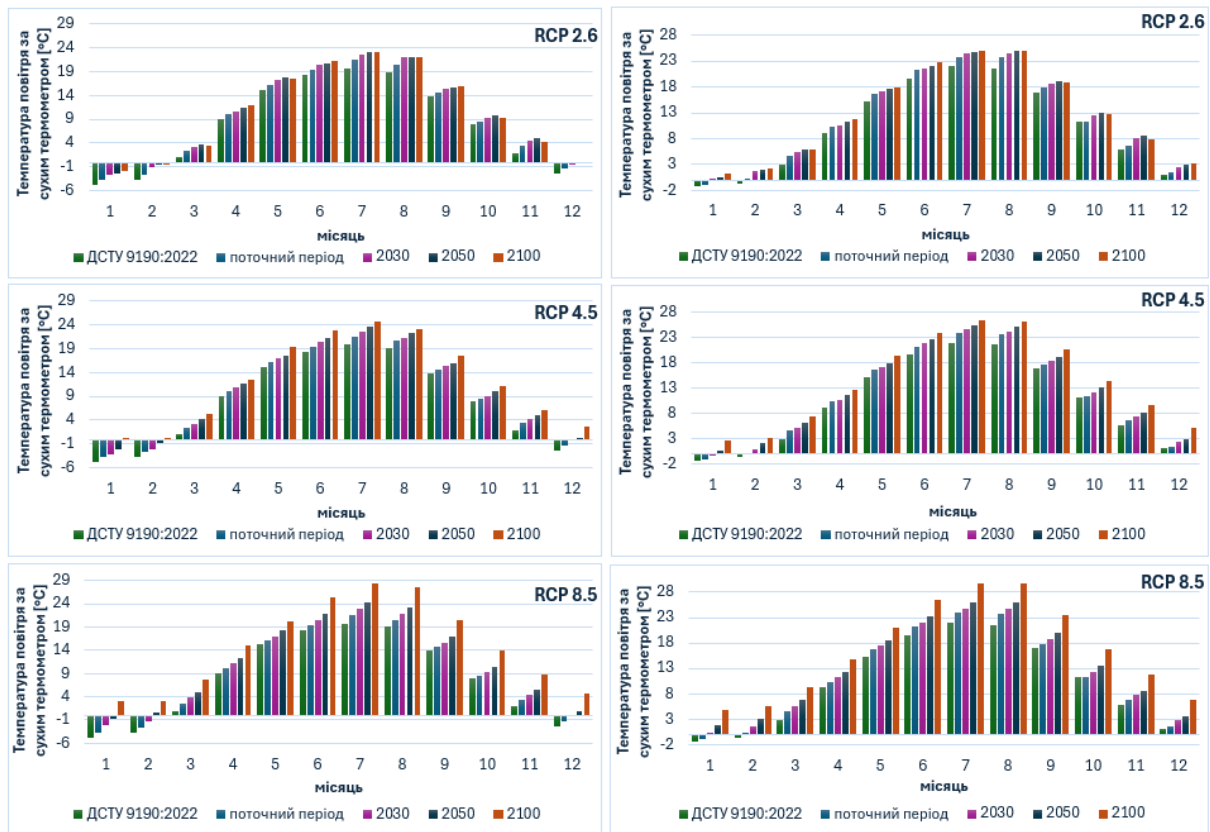


Рис. 1. Помісячна зміна температури зовнішнього середовища для різних міст за поточний період, історичні дані та відповідно до ДСТУ 9190:2022

На рис. 2 зображено помісячну зміну температури зовнішнього середовища для міста Києва та Одеси відповідно, за поточний період, згідно ДСТУ 9190:2022 [1] та відповідно до різних RCP. Середньорічна різниця температури зовнішнього середовища між поточним періодом та нормативними значеннями з ДСТУ 9190:2022 [1] для Києва –  $1,2^{\circ}\text{C}$ , а для Одеси становить  $1,1^{\circ}\text{C}$ .

Згідно прогнозів Meteorom [4] в період 2020-2100 років температура зовнішнього середовища буде збільшуватись. Наприклад для міста Київ за сценарієм RCP 2.6 до 2030 року середньорічна температура зовнішнього середовища виросте на  $0,5^{\circ}\text{C}$  в порівнянні з 2020, наступні два десятиліття відбуватиметься ріст по  $0,2^{\circ}\text{C}$ , а з 2070 ріст припинеться. За сценарієм RCP 4.5 з кожним десятиліттям температура зовнішнього середовища зростатиме в середньому на  $0,34^{\circ}\text{C}$  і у 2100 середньорічна температура для Києва становитиме  $12,2^{\circ}\text{C}$ , що на  $3,1^{\circ}\text{C}$  більше за поточну. За сценарієм RCP 8.5 з кожним десятиліттям температура зовнішнього середовища зростатиме в середньому на  $0,65^{\circ}\text{C}$  і у 2100 середньорічна температура для Києва становитиме  $14,9^{\circ}\text{C}$ , що на  $5,8^{\circ}\text{C}$  більше за поточну.

Для Одеси за сценарієм RCP 2.6 до 2030 року середньорічна температура зовнішнього середовища виросте на  $0,4^{\circ}\text{C}$  в порівнянні з 2020, до 2060 температура зросте ще на  $0,6^{\circ}\text{C}$ , і з 2060 ріст припинеться. За сценарієм RCP 4.5 з кожним десятиліттям температура зовнішнього середовища зростатиме в середньому на  $0,31^{\circ}\text{C}$  і у 2100 середньорічна температура для Одеси становитиме  $14,3^{\circ}\text{C}$ , що на  $2,9^{\circ}\text{C}$  більше за поточну. За сценарієм RCP 8.5 з кожним десятиліттям температура зовнішнього середовища зростатиме в середньому на  $0,6^{\circ}\text{C}$  і у 2100 середньорічна температура для Одеси становитиме  $16,7^{\circ}\text{C}$ , що на  $5,3^{\circ}\text{C}$  більше за поточну.



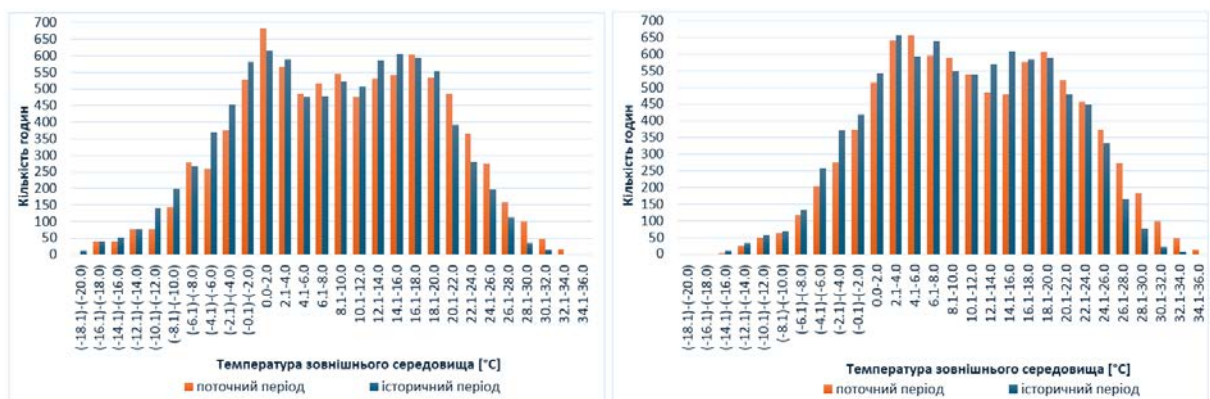
а) Київ

б) Одеса

Рис. 2. Помісячна зміна температури зовнішнього середовища для міст (а) Києва та (б) Одеси за поточний період, відповідно до ДСТУ 9190:2022 та відповідно до різних RCP

Тобто за кожним наступним сценарієм RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 відбуватиметься швидше зростання середньорічної температура зовнішнього середовища.

На рис. 3 наведено графіки кількості годин стояння температур для міста Києва та Одеси, відповідно, за поточний та історичний періоди.



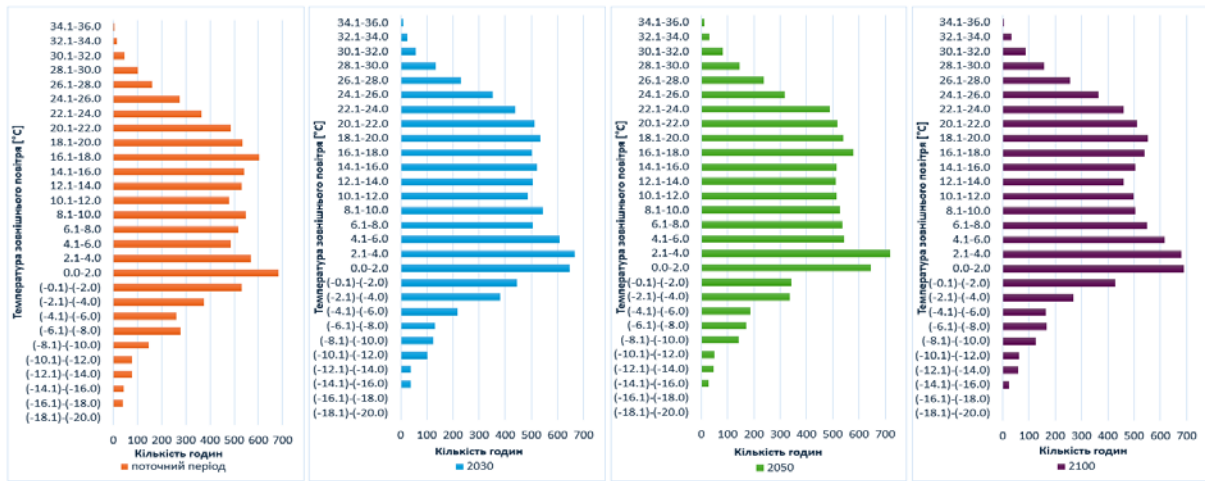
а) Київ

б) Одеса

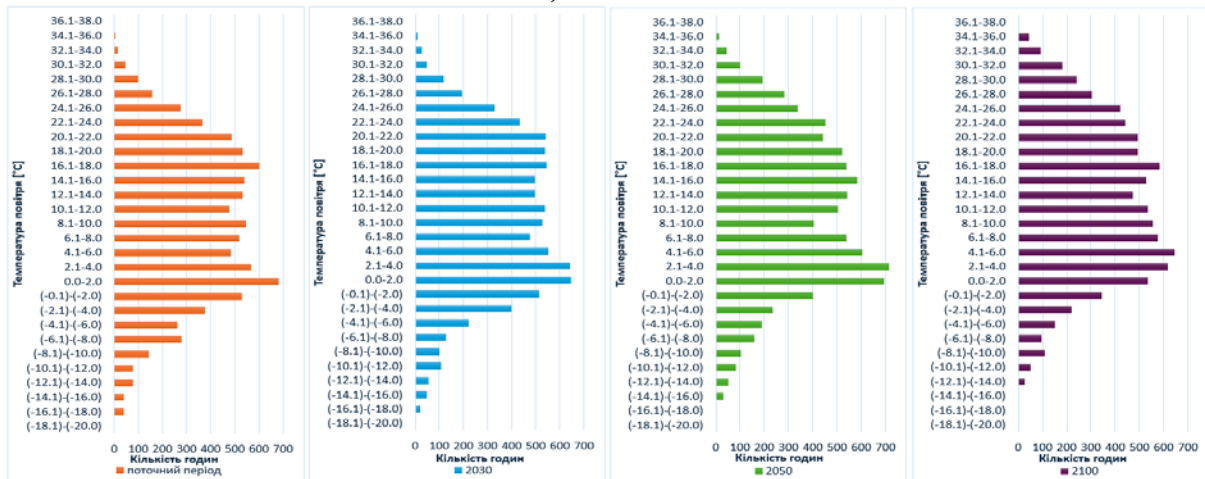
Рис. 3. Кількість годин стояння температур для міст (а) Києва та (б) Одеси за поточний та історичний періоди

З графіків (рис. 3) видно, що кількість годин стояння температур зовнішнього середовища протягом року в поточному періоді знаходиться в області вищих температур в

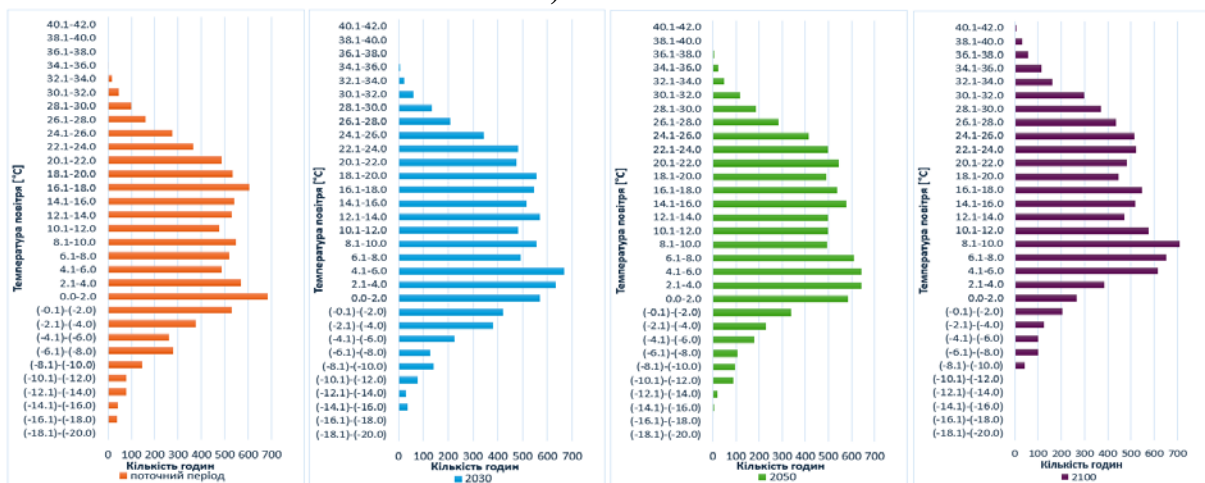
порівнянні з температурами за історичний період. Кількість «тепліших» годин збільшилась в діапазонах 0–10°C та 20–36°C.



а) RCP 2.6



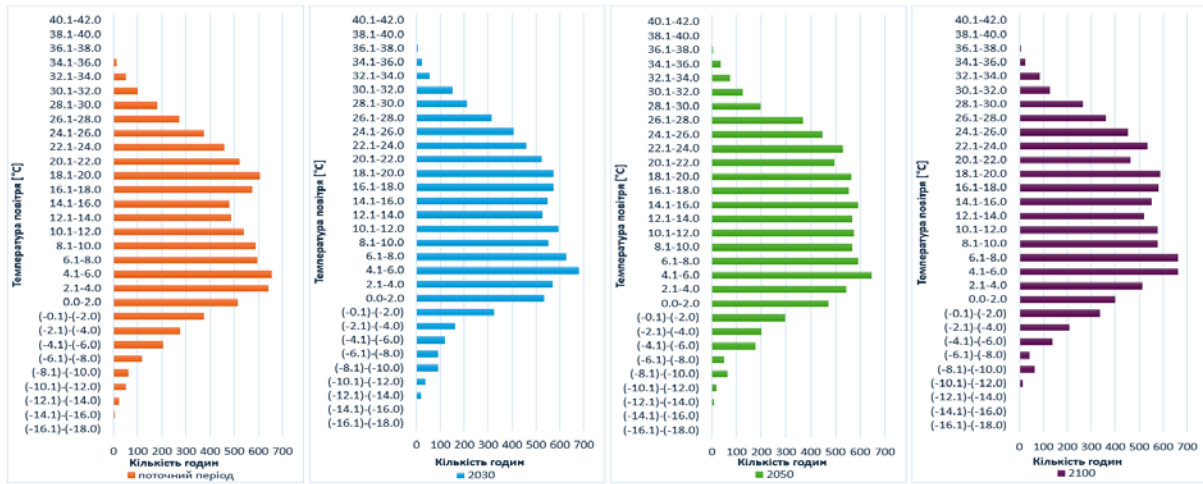
б) RCP 4.5



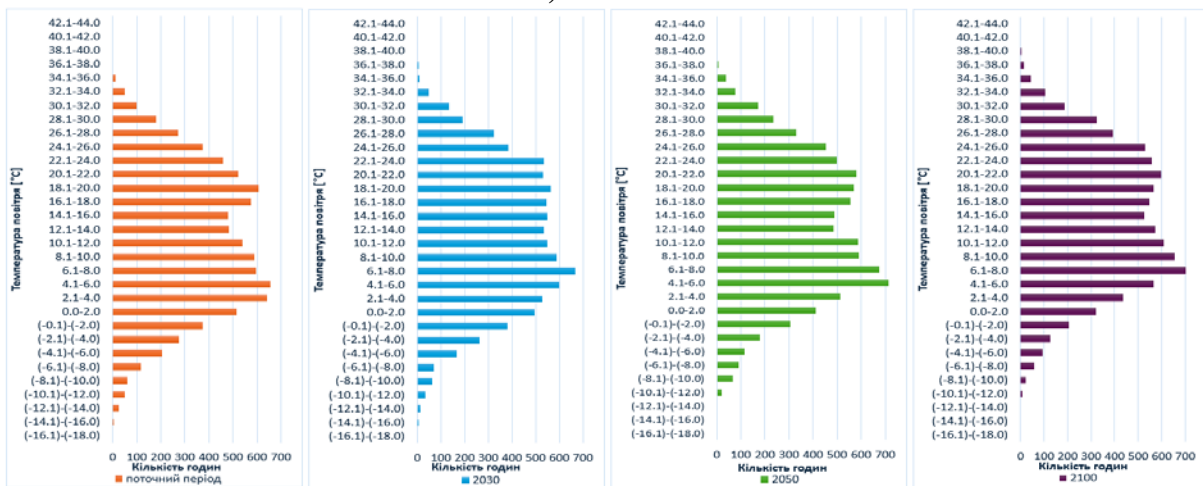
в) RCP 8.5

Рис. 4. Кількість годин стояння температур для міста Київ за поточний період та 2030, 2050 та 2100 роки за різними сценаріями

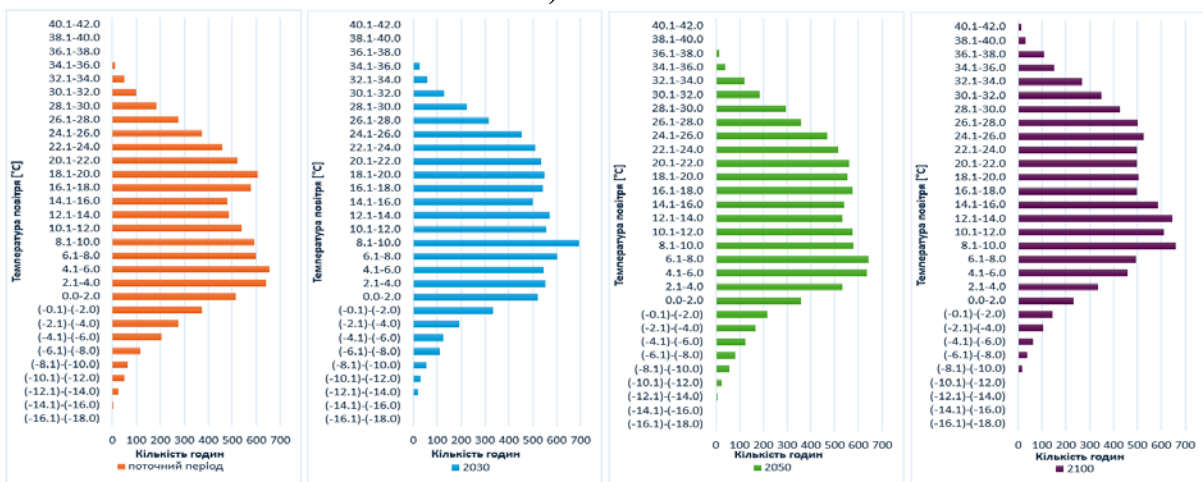
На рисунках 4 та 5 наведено порівняльні графіки кількості годин стояння температур для міста Києва та Одеси, відповідно, за поточний період та 2030, 2050 та 2100 роки за різними сценаріями зміни клімату.



а) RCP 2.6

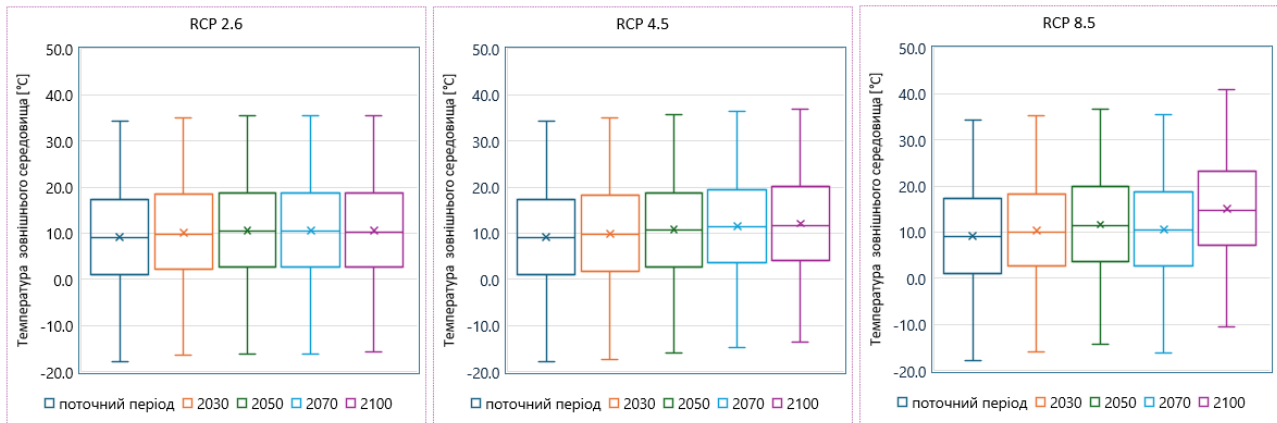


б) RCP 4.5

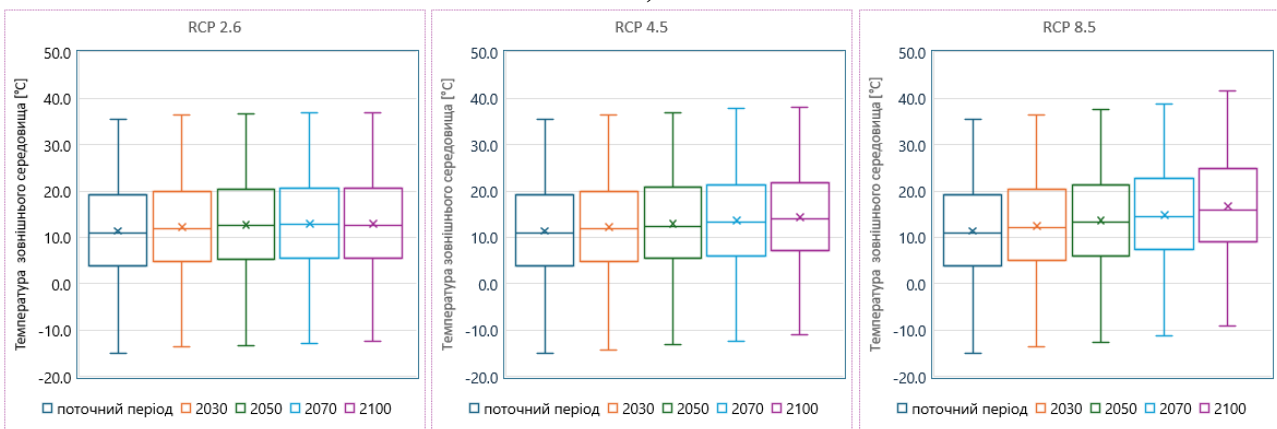


в) RCP 8.5

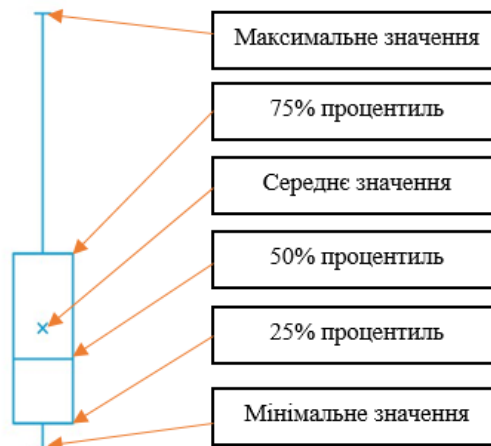
Рис. 5. Кількість годин стояння температур для міста Одеса за поточний період та 2030, 2050 та 2100 роки за різними сценаріями



а)



б)



в)

Рис. 6. Частотний розподіл погодинної температури за поточний період та 2030, 2050, 2070 та 2100 роки за сценаріями RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 для міст (а) Київ та (б) Одеса, (в) пояснення коробкового графіка

На рис. 6 наведено графіки розподілу температур для міста Київ та Одеси, відповідно, за поточний період та 2030, 2050, 2070 та 2100 роки за різними сценаріями зміни клімату.

На даних рисунках також демонструється тенденція зміщення температури зовнішнього середовища з зони з нижчими температурами в зону вищих температур.

На рис. 7 наведено графіки тривалості стояння різних градацій температур зовнішнього повітря протягом опалювального періоду для міст Києва, Одеси, Ужгорода та Луганська сформовані за даними з кліматичної бази даних Meteonorm [4] за поточний та історичний періоди, а також згідно даних сайту погоди гр.5 [9], що наведені у статті В.Г. Крамара [10].

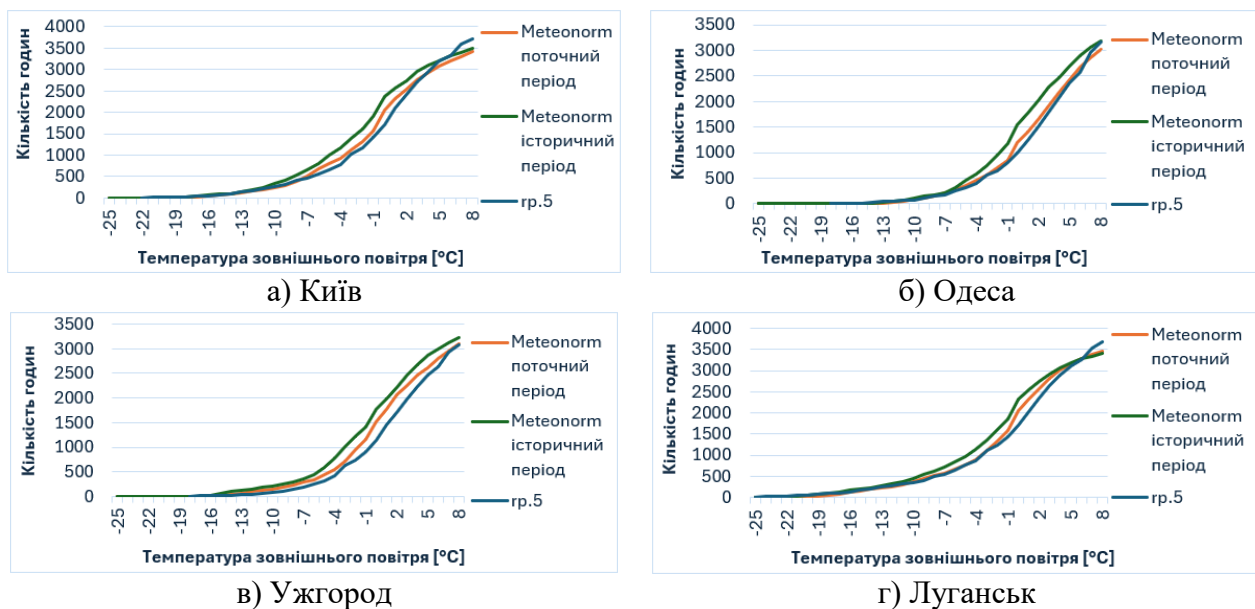


Рис. 7. Тривалість стояння різних градацій температур зовнішнього повітря протягом опалювального періоду для міст України

Зменшення HDD вказує на зменшення потреби в тепловій енергії, що можна пояснити загальною тенденцією до потепління. У містах, де спостерігається найбільш значне скорочення HDD, ймовірно, потребуватимуть набагато менше теплової енергії в майбутньому. І навпаки, збільшення значень CDD означає зростання попиту на енергію для охолодження, що може бути пов'язано з вищими температурами та частішими випадками теплових хвиль.

Ці зміни мають значні наслідки для енергоспоживання в будівлях.

Зменшення значень HDD свідчить про потенціал для енергозбереження в системах опалення, але це може бути нівельовано вищим попитом на охолодження через збільшення значень CDD. Проекти будівель та стратегії енергоменеджменту можуть потребувати адаптації до таких змін у попиті на енергію.

**Екстремальні погодні умови.** Оскільки з 70-х років 20-го століття спостерігається чітка тенденція до підвищення температури повітря у світі, кількість днів з високими температурами зовнішнього середовища з кожним роком збільшується, в той же час зменшується кількість днів коли надворі від'ємні температури. В даній роботі розглянуто такі критерії для аналізу екстремальних погодних умов як хвилі спеки, тропічні ночі, морозні дні та холодні дні.

В даному звіті розглядалися хвилі спеки (рис. 8), тропічні ночі (рис. 9), морозні дні (рис. 10) та холодні дні (рис. 11) для міста Києва та Одеси за історичний та поточний періоди, а також за 2030, 2050 та 2100 роки згідно трьох сценаріїв RCP.

Під визначенням «хвилі спеки» розуміється кількість днів в яких максимальна температура протягом доби була вищою за 30°C. Кількість тропічних ночей розраховувалась як кількість днів коли температура протягом доби не падала менше ніж 30°C. Кількість морозних днів – кількість днів протягом яких мінімальна температура за добу була менша ніж 0°C, а для холодних днів – мінімальна температура за добу менша ніж -10°C.

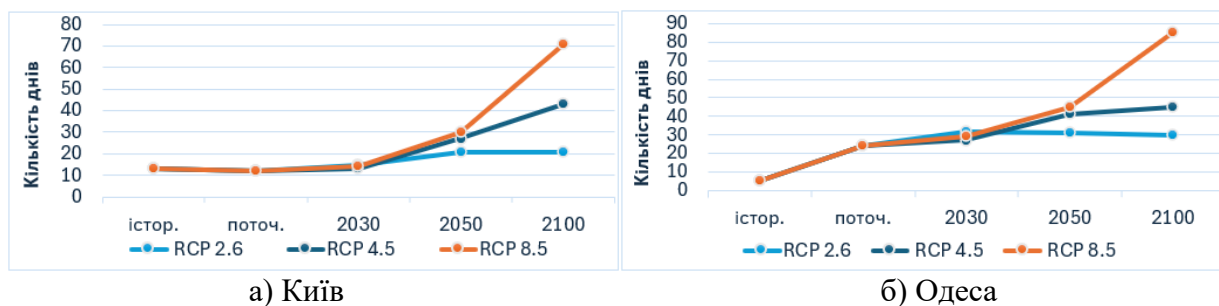


Рис. 8. Хвилі спеки

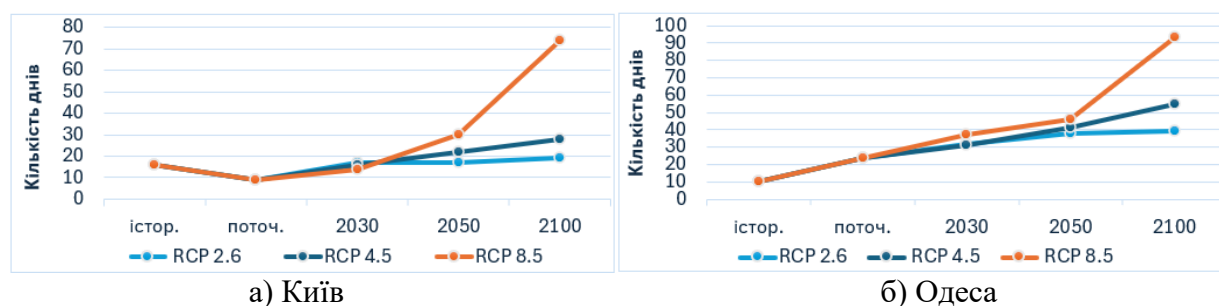


Рис. 9. Тропічні ночі

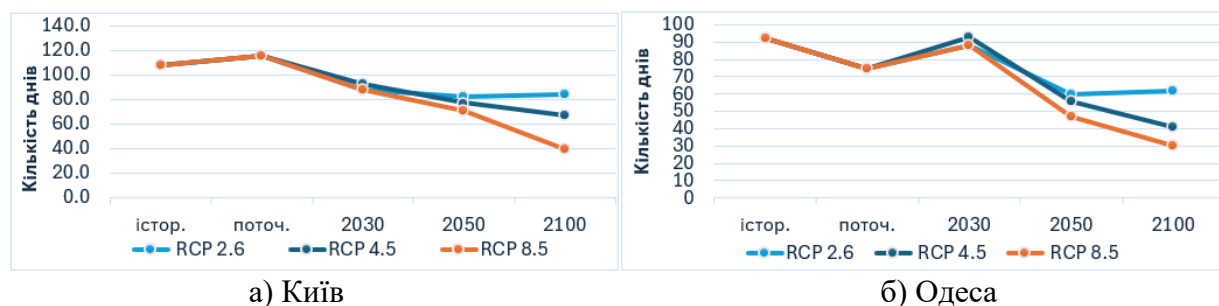


Рис. 10. Морозні дні

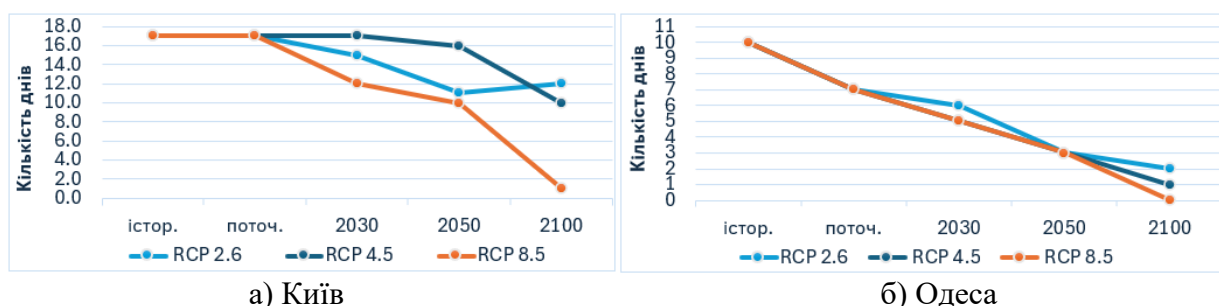


Рис. 11. Холодні дні

З рис. 8 видно, що відповідно до кожного наступного прогнозу RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 кількість хвиль спеки зростатиме все більше. Для Києва у 2100 році кількість хвиль спеки в порівнянні з поточними значеннями буде у 1,75 рази більше для RCP 2.6, у 3,6 рази більше для RCP 4.5 та у 5,9 рази більше для RCP 8.5. Для Одеси у 2100 році кількість хвиль спеки в порівнянні з поточними значеннями буде у 1,3 рази більше для RCP 2.6, у 1,9 рази більше для RCP 4.5 та у 3,5 рази більше для RCP 8.5.

Кількість тропічних ночей також має тенденцію до збільшення. За найм'якшим сценарієм RCP 2.6 у 2100 році у Києві буде на 10 днів більше з температурою протягом доби

більше 20°C, а за найгіршим сценарієм RCP 8.5 таких днів буде на 65 більше. В Одесі за найм'якшим сценарієм RCP 2.6 у 2100 році буде на 15 днів більше з температурою протягом доби більше 20°C, а за найгіршим сценарієм RCP 8.5 таких днів буде на 69 більше. Кількості морзних та холодних днів в свою чергу навпаки зменшуватимуться.

**Висновки.** В національних стандартах України наведені середньомісячні кліматичні параметри за період 1961–2005 років, і порівняльний аналіз нормативних значень по температурі зовнішнього середовища з помісячними та усередненими погодинними даними з кліматичної бази даних Meteororm [4] свідчить про наявність різниці через вплив глобального потепління і зміни клімату.

За даними майбутніх сценаріїв зміни кліматичних показників Meteororm [4] в період 2020–2100 років температура зовнішнього середовища буде збільшуватись. За сценаріями RCP 2.6, RCP 4.5 та RCP 8.5, з кожним десятиліттям температура зовнішнього середовища зростатиме і середньорічна температура для Києва становитиме більше за поточну на 2,5 °C відповідно до сценарію RCP 2.6, на 3,1 °C відповідно до сценарію RCP 4.5 та на 5,3 °C відповідно до сценарію RCP 8.5. Дані зміни призведуть до зменшення кількості градусо-днів на оталення та більшої кількості градусо-днів на охолодження.

Результати порівняння температур зовнішнього середовища за поточний та історичний періоди свідчать про збільшення кількості «тепліших» годин в діапазонах 0–10°C та 20–36°C.

Зміна температури зовнішнього середовища в майбутньому за різними сценаріями зміни клімату має тенденцію до зміщення з зони з нижчими температурами в зону вищих температур. Чим жорсткіших сценарій зміни клімату, тим швидше відбувається перехід температури зовнішнього середовища в зону вищих температур.

Аналіз екстремальних погодних умов свідчить про збільшення кількості хвиль спеки та тропічних ночей, і відповідно до зменшення кількості морозних та холодних днів.

## References

1. DSTU 9190:2022 Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pid chas opalennia, okholodzhennia, ventyliatsii, osviltennia ta hariachoho vodopostachannia [Energy Efficiency of Buildings. Method for Calculating Energy Consumption for Heating, Cooling, Ventilation, Lighting, and Hot Water Supply. Replaces DSTU B A.2.2-12:2015; effective from 2023-03-01. Official edition]. Kyiv. 156 p. [in Ukrainian].
2. DSTU-N B V.1.1–27:2010 Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivelna klimatolohiia [Protection Against Hazardous Geological Processes, Harmful Operational Impacts, and Fire. Building Climatology. Replaces SNiP 2.01.01-82 and Table 2 of DSTU-N B A.2.2-5:2007; effective from 2011-11-01. Official edition]. Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine. 127 p. [in Ukrainian].
3. Handbook Part I: Software. Meteororm 8. Radiation Data for Any Location on Earth. URL: [https://meteororm.com/assets/downloads/mn82\\_software](https://meteororm.com/assets/downloads/mn82_software).
4. Handbook Part II: Software. Meteororm 8. Radiation Data for Any Location on Earth. URL: [https://meteororm.com/assets/downloads/mn82\\_software.pdf](https://meteororm.com/assets/downloads/mn82_software.pdf).

## Література

1. ДСТУ 9190:2022 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. На заміну ДСТУ Б А.2.2-12:2015; чинний від 2023-03-01. Вид. офіц. Київ, 2022. 156 с.
2. ДСТУ-Н Б В.1.1–27:2010 Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. На заміну СНиП 2.01.01-82 і таблиці 2 ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007; чинний від 2011-11-01. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 127 с.
3. Handbook Part I: Software. Meteororm 8. Radiation Data for Any Location on Earth. URL: [https://meteororm.com/assets/downloads/mn82\\_software.pdf](https://meteororm.com/assets/downloads/mn82_software.pdf).
4. Handbook Part II: Software. Meteororm 8. Radiation Data for Any Location on Earth. URL: [https://meteororm.com/assets/downloads/mn82\\_software.pdf](https://meteororm.com/assets/downloads/mn82_software.pdf).

5. DBN V.2.6-31:2021 Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel [Thermal Insulation and Energy Efficiency of Buildings. Replaces DBN V.2.6-31:2016; effective from 2022-01-31. Official edition. Kyiv: Ukrarkhbudininform. 23 p. [in Ukrainian].
6. Ukraine: Crisis Movements. Migration Data Portal. URL: [https://www.migrationdataportal.org/ukraine/crisis-movements#:~:text=Internally%20Displaced%20Persons%20\(IDPs\),Displacement%20Tracking%20Matrix,%202024](https://www.migrationdataportal.org/ukraine/crisis-movements#:~:text=Internally%20Displaced%20Persons%20(IDPs),Displacement%20Tracking%20Matrix,%202024).
7. Deiaki pytannia funktsionuvannia mistv tymchasovoho prozhyvannia vnutrishno peremishchenykh osib: Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy [Some Issues of Functioning of Places of Temporary Residence for Internally Displaced Persons: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 930 dated 01.09.2024]. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/deiaki-pytannia-funktsionuvannia-mists-tymchasovoho-prozhyvannia-vnutrishno-peremishchenykh-s930-10923> [in Ukrainian].
8. Detlef P. van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., et al. (2011). The Representative Concentration Pathways: An Overview. *Climatic Change*, Vol. 109, No. 5. URL: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
9. Weather in Ukraine and Worldwide. RP5. URL: <http://rp5.ua>.
10. Kramar, V. (2018). Vyznachennia kryvoi tryvalosti navantazhennia (hrafika rossandera) dlia rehioniv Ukrainy [Determination of the Load Duration Curve (Rossander Graph) for the Regions of Ukraine]. *Teplofizyka i teploenerhetyka = Heat Physics and Thermal Power Engineering*, Vol. 20, No. 4, P. 44–45. URL: <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.06> [in Ukrainian].
5. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. На заміну ДБН В.2.6-31:2016; чинний від 2022-01-31. Вид. офіц. Київ: Укрархбудінформ, 2022. 23 с.
6. Ukraine: Crisis Movements. Migration Data Portal. URL: [https://www.migrationdataportal.org/ukraine/crisis-movements#:~:text=Internally%20Displaced%20Persons%20\(IDPs\),Displacement%20Tracking%20Matrix,%202024](https://www.migrationdataportal.org/ukraine/crisis-movements#:~:text=Internally%20Displaced%20Persons%20(IDPs),Displacement%20Tracking%20Matrix,%202024).
7. Деякі питання функціонування місць тимчасового проживання внутрішньо переміщених осіб: Постанова Кабінету Міністрів України від 01.09.2024 № 930. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/deiaki-pytannia-funktsionuvannia-mists-tymchasovoho-prozhyvannia-vnutrishno-peremishchenykh-s930-10923>.
8. Detlef P. van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M. et al. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*. 2011. Vol. 5, No. 109. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
9. Weather in Ukraine and worldwide. RP5. URL: <http://rp5.ua>.
10. Крамар В. Визначення кривої тривалості навантаження (графіка россандера) для регіонів України. *Теплофізика і теплоенергетика*. 2018. Т. 20, № 4. С. 44–45. DOI: <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.06>.

**DESHKO VALERII**

Dr. Sci., Professor, Professor at the Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-8218-3933>  
Scopus Author ID: 6506189670  
Researcher ID: J-6517-2017  
E-mail: [te@kpi.ua](mailto:te@kpi.ua)

**SUKHODUB IRYNA**

PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-5895-1306>  
Scopus Author ID: 57140834000  
Researcher ID: I-9788-2017  
E-mail: [ira\\_krot@ukr.net](mailto:ira_krot@ukr.net)

**BILOUS INNA**

PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-6640-103X>  
Scopus Author ID: 57194104035  
Researcher ID: J-7070-2017  
E-mail: [bilous\\_inna@ukr.net](mailto:bilous_inna@ukr.net)

**HETMANCHUK HANNA**

PhD, Engineer of the Scientific and Educational Center of Energy Decarbonization, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-1655-8642>  
Scopus Author ID: 57220188205  
Researcher ID: GRR-4081-2022  
E-mail: [hetmanchuk.anna@gmail.com](mailto:hetmanchuk.anna@gmail.com)

**KRAMARENKO SEMEN**

PhD student at the Department of Thermal and Alternative  
Energy, National Technical University of Ukraine "Igor  
Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-1534-9793>  
E-mail: [next1212122@gmail.com](mailto:next1212122@gmail.com)

<sup>1,2</sup>**DESHKO V. I.**, <sup>1,3</sup>**BILOUS I. Y.**, <sup>1</sup>**SUKHODUB I. O.**,  
<sup>1</sup>**HETMANCHUK H. O.**, <sup>1</sup>**KRAMARENKO S. O.**

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

<sup>2</sup> Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

<sup>3</sup> Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

## **ANALYSIS OF CHANGES IN OUTDOOR AIR TEMPERATURE IN UKRAINIAN REGIONS WITH SPECIAL FOCUS ON POSSIBLE EXTREME CONDITIONS**

The **purpose** of the article is to analyze outdoor temperature data from Ukraine's climatic databases and *Meteonorm*, using historical, current, and forecast data to assess the potential for utilizing renewable energy sources.

The **methodology** includes the application of synthesis and analysis methods for climatic data.

**Findings** an analysis of outdoor temperatures as climatic data that have the greatest impact on building energy efficiency and comfort provision. Special attention is paid to the analysis of extreme weather conditions, such as heatwaves, tropical nights, frost days, and cold days.

The article compares regulatory and climatic data for historical and current periods, as well as future scenarios of outdoor temperature changes influenced by anthropogenic factors. It has been established that with each subsequent RCP scenario (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5), there will be a faster increase in the average annual outdoor temperature. By 2100, outdoor temperatures in Kyiv are expected to rise by 1.2°C, 3.1°C, and 5.8°C, respectively, under RCP 2.6, RCP 4.5, and RCP 8.5 scenarios. In Odesa, the temperature increase by 2100 will amount to 1.1°C under RCP 2.6, 2.9°C under RCP 4.5, and 5.3°C under RCP 8.5.

The results also indicate an increase in the number of heatwaves and tropical nights, alongside a reduction in the number of frost and cold days.

**Originality** is the justification of the use of international climatic databases for the design of building energy supply systems using renewable energy sources in the context of climate change and the current regulatory climatology of Ukraine.

The **practical value** of the research results allows us to assess the differences in the climate of different regions of Ukraine, their changes in the context of historical, current and future climate changes. Also, the article analyzes extreme weather data, which is relevant in the context of the design of engineering systems and building sources.

**Keywords:** climatic data; *Meteonorm*; outdoor temperature; extreme weather conditions; energy efficiency.

УДК 620.9

<sup>1</sup>ЛІСОВИК В. Л., <sup>2</sup>ШЕВЧЕНКО О. М., <sup>3</sup>ШОВКАЛЮК М. М.

<sup>1</sup> Неурядова організація «Школа енергоефективності», Київ, Україна

<sup>2</sup> Навчально-науковий інститут теплової та атомної енергетики  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

<sup>3</sup> Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

## ПІДВИЩЕННЯ СПРОМОЖНОСТІ ГРОМАД У ПРОЄКТАХ ВІДНОВЛЕННЯ ШЛЯХОМ НАВЧАННЯ З ПИТАНЬ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

**Вступ.** Одним із викликів для України в нинішніх умовах є швидка і професійна реалізація проєктів відновлення в територіальних громадах, що постраждали від військової агресії. Крім того, наша держава має міжнародні зобов'язання в сфері енергетичної і екологічної безпеки, тому відновлення нерозривно пов'язано із проєктами підвищення енергетичної ефективності, розвитком систем енергетичного менеджменту. Таким чином, територіальні громади потребують кваліфікованих фахівців з відповідними знаннями і компетентностями.

**Мета.** Підвищення спроможності міст щодо участі у проєктах відновлення шляхом розвитку компетенцій фахівців територіальних громад з питань планування і впровадження енергоефективних проєктів. Розвиток спроможності громад з досягнення кліматичної нейтральності та поширення отриманого досвіду з розробки та впровадження енергоефективних проєктів в рамках відновлення України.

**Методика.** Дослідження включало опитування фахівців територіальних громад, виконання аналізу їх потреб і подальшого складання навчальної програми. В ході навчання застосовувалися активні методи, які розвивають як професійні навички для вирішення спеціалізованих завдань управління і супроводження проєктів протягом життєвого циклу („hard skills”), так і допоміжних компетентностей („soft skills”). Використано наступні методи досліджень: SWOT-аналіз, техніко-економічний аналіз, моделювання, системний підхід до управління проєктами з урахуванням життєвого циклу.

**Результати.** розроблено рекомендації і шаблони документів для створення групи впровадження проєктів, розроблено навчальну програму для фахівців територіальних громад, що включає лекції, практичні вправи, індивідуальні і групові завдання, інтерактивні ділові ігри, тестування, самостійну роботу, обмін досвідом. Організовано навчання для представників територіальних громад; в рамках виконання самостійного тренінгового завдання розроблено техніко-економічні обґрунтування (ТЕО) для 12 будівель комунальної власності.

**Наукова новизна.** На основі аналізу потреб громад сформульовано тематику для проведення тренінгів та розроблено навчальну програму для груп впровадження проєктів підвищення енергоефективності в містах України. Сформульовано порядок і рекомендації до проведення групових та індивідуальних практичних вправ, ділових ігор, виконання самостійного завдання за рекомендованим шаблоном. Все це сприяє розвитку компетенцій фахівців громад у питаннях планування та впровадження проєктів відновлення, які нерозривно пов'язані із питаннями підвищення енергоефективності і енергетичної стійкості міст.

**Практична значимість.** Розроблено, адаптовано для територіальних громад та впроваджено різні методи активного навчання. Розроблено рекомендації зі створення групи впровадження демо-проєктів, форми опитувальних листів для збору вихідної інформації, шаблони необхідних документів для реалізації проєктів (ТЕО, технічні завдання для трьох типів проєктів (СЕС дахова/наземна, впровадження частотно-регульованого електроприводу), форми для моніторингу, чек-листи.

**Ключові слова:** проєкти підвищення енергоефективності; проєкти відновлення міст; техніко-економічне обґрунтування; енергоменеджмент; професійні компетенції.

**Вступ.** Не зважаючи на те, що війна в Україні триває, влада усіх рівнів та суспільство мають бути готові до швидкої та професійної реакції на можливі загрози, потреби та виклики. Одним з таких викликів є готовність до реалізації проєктів відновлення [1]. Це продиктоване існуючими тенденціями дефіциту кваліфікованих спеціалістів, здатних реалізовувати проєкти в сфері підвищення енергоефективності. Нестачу кадрів все гостріше відчувають як територіальні громади, так і представники будівельної, комунальної сфери тощо. У разі відсутності професійно підготовлених концепцій/стратегій/проєктів відновлення існує висока ймовірність до неготовності міжнародних та національних інституцій вкладати кошти в їх реалізацію. Це в свою чергу розтягне на десятиліття процеси економічного відновлення країни та призведе до поглиблення енергетичної бідності населення.

Відбудова міст повинна відбуватися з урахуванням діючих законів [2, 3], будівельних норм [4] і стандартів [5] та інших нормативних актів [6] з енергоефективності та енергоменеджменту. Готовність громад до відновлення може бути визначена за такими показниками: наявність планів відновлення, розроблених техніко-економічних обґрунтувань, проєктно-конструкторської документації, розумінням послідовності процесів під час реалізації проєктів підвищення енергоефективності (починаючи від розробки ідеї, впровадження та моніторингу результатів після впровадження і забезпеченням ефективної експлуатації об'єкту). В умовах розвитку міжнародних відносин і змін нормативно-правової бази зростають професійні вимоги до фахівців громад, що будуть супроводжувати проєкти відновлення, тому важливим завданням є підвищення кваліфікації, розвиток компетенцій, зростання мотивації і зацікавленості персоналу територіальних громад.

Як показує досвід викладання авторів [7, 8] та інших професійних організацій [9], для роботи із дорослою аудиторією актуальним і продуктивним способом розвитку професійних навичок і допоміжних (надпрофесійних) компетенцій є впровадження нестандартних форм викладання у навчальній практиці, зокрема ділових ігор [10, 11], мозкового штурму, дебатів [12], групової роботи і SWOT-аналізу [13]. Також не можна виключати індивідуальну та колективну діяльність учасників груп впровадження проєктів в громадах для засвоєння матеріалів, що викладаються у вигляді лекцій.

**Постановка завдання:** розвиток компетенцій фахівців територіальних громад у питаннях планування та впровадження енергоефективних проєктів шляхом організації навчання та обміну досвідом.

**Задачі дослідження:**

- 1) розробка концепції програми розвитку компетенцій фахівців територіальних громад,
- 2) розробка концепції реалізації проєктів підвищення енергоефективності та узгодження із нею змісту навчальної програми підготовки фахівців від громад;
- 3) розробка практичних вправ та ділових ігор для фахівців з використанням різних методик навчання: мозковий штурм, ділова гра, групова робота, індивідуальні завдання;
- 4) розробка наскрізного самостійного завдання для отримання навичок планування обґрунтування проєктів відновлення, які нерозривно пов'язані із питаннями підвищення енергоефективності і енергетичної стійкості міст.

**Результати дослідження.** Для вирішення такої проблеми громадська організація «Школа енергоефективності» передбачила навчальну складову в проєкті «Підтримка постраждалих міст в проєктах підвищення енергоефективності» в рамках міжнародної технічної допомоги «Просування енергоефективності та імплементація Директиви ЄС з енергоефективності в Україні», що фінансується Федеральним міністерством економічного співробітництва та розвитку Німеччини (BMZ) та Державним секретаріатом з економічних питань Швейцарської Конфедерації (SECO). Однією із задач під час реалізації проєктів підвищення енергоефективності в 12 територіальних громадах України є забезпечення сталої

діяльності з енергоменеджменту, а не просто одноразове впровадження демо-проєкту (встановлення частотних перетворювачів, дахових чи наземних сонячних електростанцій).

Для реалізації демо-проєктів у територіальних громадах створено групи впровадження проєктів (ГВП). До складу ГВП можуть входити: енергоменеджер, фахівець з фінансових питань, спеціаліст з соціально-економічного розвитку та інвестицій, фахівець інженерного профілю, представник об'єкту, де впроваджується демо-проєкт, юрист та ін. Склад ГВП, розподіл ролей та обов'язків визначається окремим документом (розпорядженням).

Технології що підтримувалися в рамках реалізації даного проєкту: встановлення сонячної електростанції (дахової або наземної), впровадження частотно-регульованого електроприводу, модернізація системи опалення будівлі. Передбачено здійснення моніторингу енергоспоживання та інших індикаторів з визначеною періодичністю та за визначеною формою впродовж трьох років по завершенню впровадження демо-проєкту.

Навчальна програма була побудована так, щоб проєкти, що реалізуються в громадах, розглядалися як приклад, на якому будуть відпрацьовані механізми його впровадження від ідеї, розробки техніко-економічного обґрунтування до монтажу та ефективної експлуатації обладнання та будівель. В ході навчання застосовано орієнтований на практику підхід, поставлено наступні завдання:

- формування сталих підходів до системної діяльності з енергоменеджменту,
- формування навичок управління подібними проєктами, включаючи питання контролю якості виконання будівельних робіт, енергоефективної експлуатації обладнання та будівель впродовж їх життєвого циклу;
- обмін досвідом та кращими практиками діяльності у сфері муніципального енергетичного менеджменту.

Було заплановане виконання учасниками самостійного тренінгового завдання на прикладі демо-проєкту, що дозволило пройти всі стадії його життєвого циклу від ідеї, розробки ТЕО і до моніторингу результатів впровадження. З метою ефективного засвоєння матеріалів було передбачено проведення вступного та фінального тестування по закінченню навчання, а також перевірка тренерами виконаного тренінгового завдання зі зворотним зв'язком з рекомендаціями щодо доопрацювання.

Цикл тренінгів організовано та проведено ГО «Школа Енергоефективності» протягом двох місяців (в період вересень-листопад 2024). Навчання проходили представники територіальних громад, в яких впроваджуються демо-проєкти: Суми, Конотоп, Охтирка, Балаклія, Бровари, Павлоград, Запоріжжя, Кривий Ріг, Мерефа, Первомайськ, Златопіль, Миколаїв.

**Концепція реалізації проєктів підвищення енергоефективності.** Управління процесом впровадження демо-проєктів відновлення включає:

- аналіз технічних і фінансових аспектів наданих громадами проєктних заявок для участі у конкурсному відборі;
- розробку технічного завдання на проєктування;
- формування переліку обладнання та робіт для проведення необхідних закупівель;
- проведення процедури закупівлі послуг, що включають: розробку проєктно-конструкторської документації, її експертизу; закупівлю, доставку, монтаж, пуско-налагоджувальні роботи та авторський нагляд;
- організацію незалежного технічного нагляду за процесом виконання будівельно-монтажних робіт;
- забезпечення моніторингу і контролю за процесом впровадження;
- організацію та проведення навчання представників груп впровадження проєкту;
- забезпечення введення обладнання в експлуатацію;

- передачу обладнання на баланс громаді;
- здійснення систематичного збору, аналізу та узагальнення інформації протягом впровадження демо-проєкту.

Розроблено чек-листи (у вигляді гугл-форми) про стан реалізації демо-проєкту на різних етапах, форми для звітності, шаблони технічних завдань, шаблон ТЕО.

Таким чином, фахівці, що будуть супроводжувати проєкти в територіальних громадах, повинні мати необхідні знання і компетенції для провадження такої діяльності. Проведене передтренінгове опитування представників груп впровадження проєктів в громадах дозволило сформуванню навчальної програми з урахуванням їх потреб. Важливим завданням при цьому було навчити представників від територіальних громад основам управління проєктами, включаючи всі стадії життєвого циклу від ідеї, розробки ТЕО до моніторингу результатів впровадження.

**Зміст і особливості навчальної програми підготовки фахівців від громад.** В рамках тренінгу розглядалися наступні теми:

Тема 1. Енергетичний менеджмент в територіальних громадах.

Тема 2. Основи управління проєктами: цілі і обсяг проєктів, фази життєвого циклу, планування, моніторинг, оцінка і управління ризиками.

Тема 3. Реалізація проєкту з підвищення енергоефективності та впровадження відновлюваних джерел енергії.

Тема 4. Практичні питання експлуатації систем, створених в рамках демо-проєктів.

Тема 5. Контроль якості у будівництві.

Тема 6. Ефективна експлуатація будівель (фасиліті менеджмент).

Тема 7. Зелене підприємництво.

Для врахування безпекових умов тренінги було організовано в онлайн форматі з поєднанням теоретичної, практичної, інтерактивної взаємодії та обміну досвідом з учасниками. Використано платформи ZOOM (обмежена кількість учасників від громади) та YouTube (для усіх бажаних). Змістовно тренінг складався із двох сесій по два дні (кожен по 8 годин) з інтервалом в один місяць для виконання самостійного завдання.

Для підвищення ефективності навчання в ході тренінгів використано наступні інтерактивні методи: робота в групах; мозковий штурм; опитування; тестування; практичні вправи, що передбачають проведення розрахунків; практичні вправи з управлінських завдань; ділові ігри.

Розглянемо деякі розроблені в рамках тренінгу інтерактивні заняття.

*Практична вправа: діаграма Ганта як інструмент планування.*

Мета: планування впровадження проєкту підвищення енергоефективності за допомогою діаграми Ганта.

Завдання: визначити перелік завдань і підзавдань, перелік відповідальних та залучених осіб/організацій, створити часову шкалу, побудувати смуги завдань і віхи, встановити залежності.

Метод і формат проведення: групова робота в інтерактивному режимі, результати записуються в файл Excel, потім презентуються від команди і обговорюються. Тривалість проведення – 20 хв.

Приклад планування проєкту, розробленого слухачами, наведено на рис. 1.

*Практична вправа: розрахунки фінансово-економічних показників проєктів.*

Мета: порівняльний аналіз фінансової привабливості двох проєктів підвищення енергоефективності з урахуванням щорічної економії (прямих витрат та непрямих вигід від впровадження).

№	Завдання	Відповідальна особа	Залучені особи	Гант		
				Жовтень, 24	Листопад, 24	Грудень, 24
<b>1</b>	<b>Внутрішнє узгодження ТЕО.</b>					
1.1	Підготовка та затвердження розпорядження щодо формування вимог ТЕО.	Сергій (енергоменеджер)	(енерго-менеджм)	✓		
1.2	Підготовка документу			✓		
1.3	Презентація проекту			✓		
1.4	Внутрішнє затвердження документа.	Сергій	ЕМ+директор	✓		
<b>2</b>	<b>Зовнішнє узгодження ТЕО.</b>					
2.1	Надання інформації згідно запиту ГО "ШЕЕ"	Сергій	Економ відділ	✓		
2.2	Узгодження ТЕО для подальшого провдення процедури закупівель	Сергій	Разом з ГО "ШЕЕ", директор	✓		
<b>3</b>	<b>Тенден, залучення розробника проекту.</b>					
3.1	Тендерна пропозиція (проектування)	Сергій	Сергій, Ірина	✓		
3.2	Проведення тендеру та визначення переможця.	Ірина	тендер.відділ	✓		
3.3	Комунікація з переможцем, підписання договору.	Сергій	Сергій, Ірина		✓	
3.4	Розробка проекту.	Компанія-проектант			✓	
3.5	Знайомство проектантив з об'єктом фізично.	Проектант+енергоменеджер			✓	
3.6	Узгодження отриманого ТЕО з кураторами ГО "ШЕЕ".	Сергій	Разом з ГО "ШЕЕ"			
<b>4</b>	<b>Закупівля</b>					
4.2	Процедура закупівель по списку преоктанта.	Марія	Відділ закупівель.			
4.3	Прийомка замовлений комплектуючих та розміщення на складі.	Микола	Зав. Складу			
4.4	Перевірка отриманих комплектуючих по тех. хар-кам.	Сергій	Олександр, Гол.Інж.			
<b>5</b>	<b>Підготовчі процеси</b>					
5.1	Підготовка даху об'єкта до монтажу СЕС панелей.	Олександр, Гол.Інж.	Бригада №1			
5.2	Підготовка приміщення для розташування компонентів та інвертора.	Олександр, Гол.Інж.	Бригада №2			
5.3	Перевірка, модернізація ел. мереж	Олександр, Гол.Інж.	Електрик			
<b>6</b>	<b>Етап будівництва</b>					

Рис. 1. Приклад діаграми Ганта для проекту підвищення енергоефективності

Завдання: розрахувати щорічну економію витрат від зменшення споживання електроенергії та зменшення екологічних платежів за викиди CO<sub>2</sub>; визначити простий та дисконтований термін окупності, коефіцієнт дисконтування, чисту приведену вартість (NPV), внутрішню норму рентабельності (IRR). Порівняти фінансово-економічні показники двох проектів (А та Б) та визначити найбільш доцільний варіант.

Метод і формат проведення: індивідуальна робота в шаблоні документу Excel (фінансовий аналіз в табличному вигляді (табл. 1) із представленням інформації через прогнозування руху грошових коштів).

Таблиця 1

**Шаблон для представлення результатів розрахунків (проект А, проект Б)**

Рік	Інвестиції, €	Щорічні експлуатаційні витрати, €	Щорічна економія (вигоди) від проекту, €	Грошовий потік, €	Кумулятивний грошовий потік, €	Дисконтований грошовий потік, €
0						
1						
2						
....						
19						
20						
						NPV=.....

*Практична вправа: визначення базового рівня енергоспоживання для будівлі.*

Мета: визначення базового енергоспоживання для оцінювання ефекту від впровадження заходів з підвищення енергетичної ефективності.

Завдання: визначити базовий рівень енергоспоживання будівлі на потреби електропостачання, опалення та гарячого водопостачання з приведенням до стандартних погодних умов.

Метод і формат проведення: робота в групах (підготовчий період: заповнення опитувальних листів щодо енергоспоживання за видами навантажень для об'єкту дослідження) та індивідуальні розрахунки на тренінгу (за прикладом, що наводить тренер на слайдах під час роз'яснень, послідовність обчислень наведено на рис. 2). Час проведення – 30 хвилин.



Рис. 2. Приклад послідовності обчислень при визначенні базового рівня енергоспоживання будівель

Під час визначення базового рівня споживання на потреби опалення фактичне споживання будівлі приводиться до стандартних погодних умов з урахуванням кількості градусо-днів опалювального періоду [14]. Градус-дні – характеристика клімату в порівняльній період (наприклад, рік), може бути розрахована за формулою:

$$\Gamma D = \sum_j (t_{вн} - t_{зовнj}) \cdot K_{дiбj}, \quad (1)$$

де  $j$  – місяць року, що належить до опалювального періоду;  $t_{вн}$  – нормативна температура внутрішнього повітря у приміщеннях, приймається для відповідних будівель і споруд згідно їх призначення,  $t_{зовнj}$  – температура зовнішнього повітря середня для місяця  $j$ , визначається за даними метеорологічної служби для відповідного року або за [15] для стандартного року, °C;  $K_{дiбj}$  – кількість днів опалювального періоду в місяці  $j$ .

*Ділова гра: залучення зацікавлених сторін до реалізації проєктів.*

Мета: аналіз можливостей і ризиків у взаємодії із стейкхолдерами (зацікавленими сторонами) проєкту

Завдання: проаналізувати рівень залученості і впливу двох типів стейкохлерів (прямий та непрямий) на реалізацію проєктів за наступними критеріями: рівень впливу, рівень залученості, потреби/вимоги, можливості/очікування, загрози/ймовірні проблеми, стратегія комунікації.

Типи прямих стейкхолдерів (безпосередньо залучений до реалізації проєкту): постачальники або виробники обладнання, монтажні організації; структурні підрозділи територіальної громади; комунальні підприємства міста, постачальники енергії, тощо. Типи непрямих стейкхолдерів (ті, що мають вплив на прямих, або потенційні партнери): засоби масової інформації, населення, споживачі будівлі, потенційні клієнти, потенційні постачальники або партнери.

Метод і формат проведення: мозковий штурм, робота в групах. Після обмірковування в групах учасники тренінгу заповнюють наданий шаблон для ділової гри, доповідають результати та відбувається обговорення серед усіх учасників. Тривалість проведення: 30 хв.

*Ділова гра «Бізнес-модель Canvas на прикладі міської лікарні».*

Завдання: зелене бізнес-планування - огляд стійкої бізнес-моделі Canvas на прикладі об'єкту органу місцевого самоврядування

Метод і формат проведення: мозковий штурм, час на проведення -40 хвилин.

Об'єкт дослідження: поліклініка, де окрім кабінетів профільних лікарів є діагностичний центр, денний стаціонар, лабораторії, пункт невідкладної допомоги.

Послідовність проведення: тренер пояснює суть завдання, наводить основні дані для об'єкту дослідження, показує як заповнюються перші два блоки бізнес-моделі, а блоки 3–10 заповнюються тренером як узагальнення відповідей учасників тренінгу (наприклад, в чат). Для кращого розуміння на слайд виводиться перелік питань, які потрібно розглянути (рис. 3). Тренер записує відповіді на полотні бізнес-моделі Canvas, а потім порівнює відповіді учасників із попередньо заповненим варіантом, після чого відбувається обговорення. Приклад заповненого полотна бізнес-моделі Canvas в результаті проведеної ділової гри на тренінгу наведено на рис. 4.



Рис. 3. Приклад послідовності заповнення бізнес-моделі Canvas

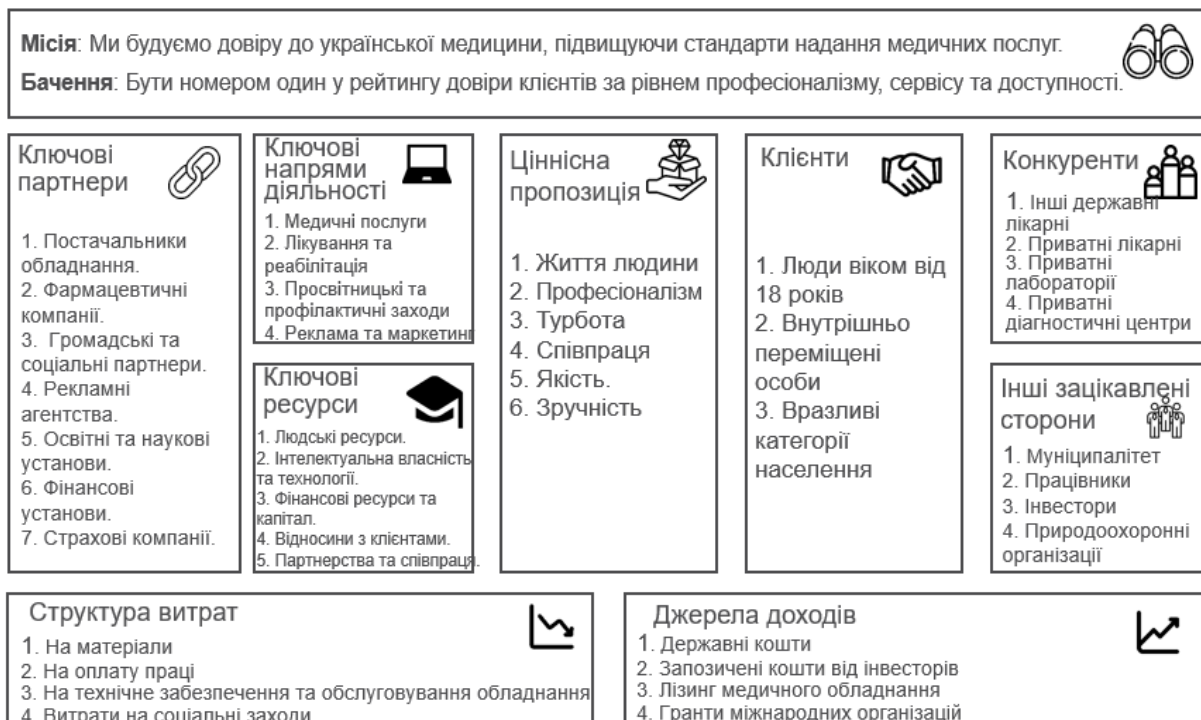


Рис. 4. Полотно бізнес-моделі Canvas для міської поліклініки для дорослих

#### Опис самостійного завдання.

**Мета:** сприяння сталості реалізації напрямку енергоефективності в територіальних громадах шляхом розвитку навичок представників територіальних громад в питаннях Постановка завдання: розробка техніко-економічного обґрунтування з впровадження дахової сонячної електростанції (СЕС) для отримання фінансування за державними або інвестиційними програмами (за розробленим шаблоном).

**Формат виконання:** колективно групою впровадження демо-проєкту від громади.

Основні розділи ТЕО, що розроблялися учасниками тренінгу за наданим шаблоном: резюме; загальна характеристика об'єкта; організаційний план; план реалізації проєкту; фінансовий аналіз; прогноз економічного та соціального ефекту; оцінка ризиків; оцінка впливу на довкілля та ін.

Кожна територіальна громада самостійно обирала об'єкт для розрахунку. Зважаючи на часті відключення від електропостачання громадам було рекомендовано розглянути проєкт з забезпечення автономного енергоживлення об'єкту соціальної сфери міста, що дозволить забезпечити його функціонування в нормальному режимі. Розглядалися такі альтернативні можливості електропостачання: дизель-генератор, когенераційна установка на природному газі, сонячна електростанція, вітроелектростанція. Розробка подібних проєктів відповідає стратегічним програмним документам держави, оскільки спрямовані на зменшення залежності від викопного палива та створення автономних джерел генерації з відновлюваних джерел [16]. SWOT-аналіз варіантів автономного електропостачання об'єктів показав доцільність впровадження СЕС. Тематика проєктів підвищення енергоефективності, що розроблялися в рамках виконання самостійного завдання: дахові СЕС потужністю від 20 до 300 кВт гібридного типу. Всього було розроблено 12 ТЕО для різних об'єктів комунальної інфраструктури.

Для визначення базового рівня енергоспоживання учасниками було проаналізовано інформацію щодо електроспоживання будівлі у річному, місячному та погодинному вимірі за

релевантні роки. Крім того, було проаналізовано схеми електропостачання, режими експлуатації об'єктів і визначено перелік електрообладнання, що має бути забезпечене енергією від СЕС. З метою визначення можливості спорудження СЕС на даху будівлі для кожного об'єкту потрібно також виконати обстеження технічного стану.

Для визначення планової генерації електричної енергії даховою СЕС і співставлення із потребою для будівлі використано онлайн-калькулятор [17], приклад такого аналізу показано на рис. 5.

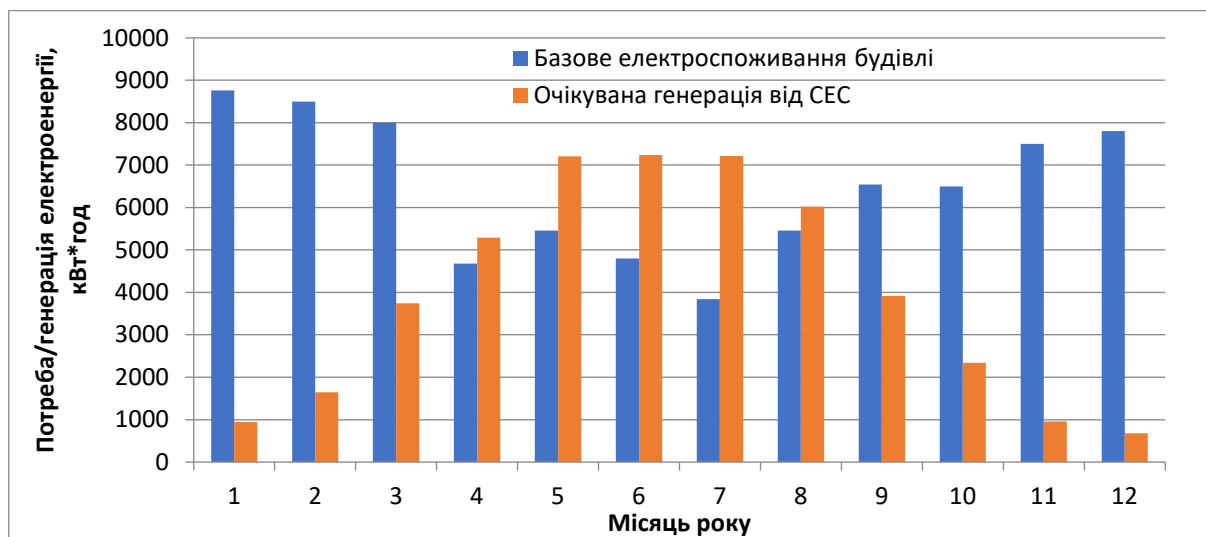


Рис. 5. Приклад представлення даних аналізу генерованої від СЕС енергії та потреби в енергозабезпеченні критичного обладнання об'єктів

Для оцінювання економічної привабливості проєктів підвищення енергоефективності учасниками обчислювалися [18]:

- простий термін окупності:

$$PBP = \frac{I_0}{CF}, \quad (2)$$

де  $I_0$  – початкові інвестиції (капітальні витрати), грн;  $CF$  – чиста річна економія, грн/рік;

- дисконтований термін окупності (DPP):

$$DPP = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} \geq I_0, \quad (3)$$

де  $n$  – горизонт планування (часовий горизонт дії проєкту), років;  $t$  – порядковий номер періоду;  $i$  – ставка дисконтування;  $CF_t$  – чистий грошовий потік за період  $t$ , грн;

- чиста приведена вартість (net present value – NPV):

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t - C_t}{(1+i)^t} - I, \quad (4)$$

де  $CF_t$  – грошовий потік за проєктом у  $t$ -му році,  $C_t$  – витрати за проєктом; при цьому коефіцієнт дисконтування для кожного року визначається за формулою:

$$k_i = \frac{1}{(1+i)^n}; \quad (5)$$

- внутрішня норма рентабельності IRR.

Результати розрахунків впровадження системи резервного електропостачання на базі СЕС по кожній громаді зводилися до таблиці, форма якої показана нижче (табл. 2).

Таблиця 2

Узагальнені техніко-економічні показники впровадження СЕС (на прикладі ТЕО лікарні, розробленого однією з територіальних громад)

Перелік показників	Значення
1. Встановлена потужність, кВт	300
2. Ємність акумуляторних батарей, кВт·год	300
2. Виробництво електроенергії, кВт·год./рік	372595
3. Капітальні витрати, євро	570000
4. Експлуатаційні витрати, євро/рік	1800
5. Питомі капіталовкладення, євро/кВт	1900
6. Собівартість електроенергії, згенерованої СЕС, євро/кВт·год	0,97
7. Тариф на електроенергію, існуючий/ прогнозований, євро/кВт·год	0,22/0,26
8. Чистий прибуток від впровадження, євро/рік при існуючому / прогнозованому тарифі	81727 / 96467
9. Простий термін окупності, років при існуючому / прогнозованому тарифі	6,1/5,1
10. Економія традиційного палива, т.у.п./рік	130,78
11. Зменшення викидів CO <sub>2</sub> , т/рік	166,92
12. Чиста приведена вартість, NPV, євро при існуючому / прогнозованому тарифі	4038 / 17633
13. Внутрішня норма рентабельності, IRR, % при існуючому / прогнозованому тарифі	13,23 / 18,11

Таким чином, програма навчання практично спрямована на актуальні технології підвищення енергоефективності та відновлювальних джерел, а також дозволяє громадам надати необхідні знання та практичні навички членам груп впровадження проєктів з підвищення енергоефективності, включаючи розробку ТЕО, розробку технічного завдання на проєктування, контроль якості виконання будівельно-монтажних робіт, ефективну експлуатацію будівель та обладнання після впровадження проєкту.

**Висновки.** На основі вивчення потреб територіальних громад сформульовано тематику і розроблено навчальну програму проведення тренінгів для фахівців, що будуть впроваджувати проєкти відновлення в громадах з урахуванням діючих вимог щодо енергоефективності. В ході навчання застосовуються активні методи розвитку професійних компетенцій, в тому числі практичні вправи, ділові ігри, індивідуальні і групові завдання, а також самостійна робота з розробки техніко-економічного обґрунтування впровадження відновлюваних джерел енергії в якості резервного джерела для об'єктів комунальної власності. Створено рекомендації зі створення групи впровадження демо-проєктів, форми опитувальних листів для збору вихідної інформації, шаблони необхідних документів для реалізації проєктів. Розроблено 12 техніко-економічних обґрунтувань на отримання фінансування проєктів підвищення енергоефективності. Навчальна програма може бути рекомендована до поширення в інших територіальних громадах, це сприятиме формуванню та підготовці груп впровадження проєктів підвищення енергоефективності.

Пропозиції для подальших досліджень: доопрацювання програми тренінгу:

- варто надати більше часу на дискусії і обмін досвідом і розширити тему щодо актуальних грантових конкурсів, в яких громада може взяти участь;

- варто було б створити окремі сесії з вивчення спеціалізованих питань по профільним напрямкам: експлуатація інженерних систем, фінансові аспекти, ведення національних баз даних будівель.

## References

1. Pro zatverdzhennia poriadkiv z pytan vidnovlennia ta rozvytku rehioniv i terytorialnykh hromad: Postanova Kabinetu ministriv Ukrainy [On the approval of procedures for the restoration and development of regions and territorial communities. Resolution of the CMU of July 18, 2023]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/731-2023-%D0%BF#n11> [in Ukrainian].
2. Pro enerhetychnu efektyvnist budivel: Zakon Ukrainy [About energy efficiency of buildings: Law of Ukraine No. 2118-VIII, ed. from 26.06.2024]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text> [in Ukrainian].
3. Pro enerhoefektyvnist: Zakon Ukrainy [About energy efficiency. Law of Ukraine No. 1818-IX from 18.09.2024]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text> [in Ukrainian].
4. DBN V.2.6–31:2021 Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel [Thermal insulation and energy efficiency of buildings]. Kyiv, 2021. 27 p. [in Ukrainian].
5. DSTU ISO 50001:2020 Systemy enerhetychnoho menedzhmentu. Vymohy ta nastanova shchodo vykorystannia [Energy management systems. Requirements and instructions for use] (ISO 50001:2018, IDT) [in Ukrainian].
6. Pro vprovadzhennia system enerhetychnoho menedzhmentu: Postanova Kabinetu ministriv [On the introduction of energy management systems: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 23.12.2021 No. 1460]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1460-2021-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
7. Lisovyk, V. L., Vasylenko, V. I., Shovkaliuk, M. M. (2024). Spriyannia rozvytku pryvatnoho biznesu v Ukraini cherez populiaryzatsiiu idei zelenoho pidpriemnytstva ta staloho rozvytku v systemi vyshchoi osvity [Promoting the development of private business in Ukraine through the popularization of green entrepreneurship ideas and sustainable development in the higher education system]. *Materials of the Internet conference “Sustainable development of the EU – best practices for Ukraine”* (Lviv, February 22, 2024): Lviv Polytechnic National University, 2024. P. 116–121 [in Ukrainian].
8. Shovkaliuk, M. M., Deshko, V. I., Inshekov, Ye. M. (2013). Pidvyshchennia yakosti pidgotovky fakhivtsiv z enerhomenedzhmentu [Improving the quality of training of energy management specialists]. *Visnyk KNUTD = Bulletin of the KNUTD*, № 6, P. 107–112 [in Ukrainian].
9. Petrovych, V. S. (2020). Innovatsiina diialnist navchalno-praktychnoho tsentru vidnovliuvanoi enerhetyky – shliakh do enerhonezalezhnosti [Innovative activities of the educational and practical center for renewable energy – the path to energy independence].

## Література

1. Про затвердження порядків з питань відновлення та розвитку регіонів і територіальних громад: Постанова Кабінету міністрів України від 18.06.2023 № 2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/731-2023-%D0%BF#n11>.
2. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України № 2118-VIII, ред. від 26.06.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>.
3. Про енергоефективність: Закон України № 1818-IX від 18.09.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>.
4. ДБН В.2.6–31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. К. 2021. 27 с.
5. ДСТУ ISO 50001:2020 Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання (ISO 50001:2018, IDT).
6. Про впровадження систем енергетичного менеджменту: Постанова Кабінету міністрів України від 23.12.2021 № 1460. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1460-2021-%D0%BF#Text>.
7. Лісовик В. Л., Василенко В. І., Шовкалюк М. М. Сприяння розвитку приватного бізнесу в Україні через популяризацію ідей зеленого підприємництва та сталого розвитку в системі вищої освіти. *Materials of the Internet conference “Sustainable development of the EU – best practices for Ukraine”* (Lviv, February 22, 2024): Lviv Polytechnic National University, 2024. P. 116–121.
8. Шовкалюк М. М., Дешко В. І., Іншеков Є. М. Підвищення якості підготовки фахівців з енергоменеджменту. *Вісник КНУТД*. 2013. № 6. С. 107–112.
9. Петрович В. С. Інноваційна діяльність навчально-практичного центру відновлювальної енергетики – шлях до енергонезалежності. *Професійна освіта*. 2020. № 2. С. 5–6.

*Profesiina osvita = Vocational education*, № 2, P. 5–6 [in Ukrainian].

10. Derev'ianko, D. H., Shovkaliuk, M. M. (2023). Formuvannia soft skills u studentiv enerhetychnykh spetsialnostei shliakhom vprovadzhennia u navchalnyi protses aktyvnykh metodiv navchannia [Formation of soft skills in students of energy specialties by introducing active learning methods into the educational process]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh = Technologies and Engineering*, № 6 (17), P. 9–20. URL: <https://vistnuk.knutd.edu.ua/wp-content/uploads/sites/2/2024/02/6-2023-1.pdf> [in Ukrainian].

11. Tsarehrad'ska, K. V. (2012). Vykorystannia navchalno-rol'ovykh ihor dlia rozvytku inshomovnoi komunikatyvnoi kompetensii studentiv-mahistriv ekonomichnykh spetsialnostei [The use of educational role-playing games for the development of foreign language communicative competence of master's students in economic specialties]. *Visnyk NTUU "KPI" = Bulletin of NTUU "KPI"*, Vol. 1, P. 150–153 [in Ukrainian].

12. Denysiuk, S. P., Shovkaliuk, M. M. (2023). KPI na shliakhu formuvannia enerhoefektyvnoho suspilstva. 25-richnyi dosvid [KPI on the path to creating an energy-efficient society. 25 years of experience]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia = Energy: economics, technologies, ecology*, № 1, P. 7–21 [in Ukrainian].

13. Ivasechko, O., Dorosh, L. (2016). SWOT-analiz enerhetychnoi bezpeky Ukrainy [SWOT analysis of energy security of Ukraine]. *Humanitarian Vision*, Vol. 2, No. 2, P. 25–30 [in Ukrainian].

14. Pro zatverdzhennia Metodyky vyznachennia bazovoho rivnia enerhetychnoi efektyvnosti: Nakaz Minrehionbudu [On the approval of the Methodology for determining the basic level of energy efficiency. Order of the Ministry of Regional Construction No. 1140 dated 14.12.2023]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0192-24#Text> [in Ukrainian].

15. DSTU-N B.V.1.1-27:2010 Budivelna klimatolohiia [Building climatology]. Kyiv, 2011. 127 p. [in Ukrainian].

16. Pro zatverdzhennia Natsionalnoho planu dii z vidnovliuvanoi enerhetyky na period do 2030 roku ta planu zakhodiv z yoho vykonannia: Postanova KМУ [On the approval of the National action plan for renewable energy for the period until 2030 and the plan of measures for its implementation: Resolution of the CMU dated 13.08.2024 No. 761-2024-r]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text> [in Ukrainian].

17. Onlain-kalkuliator heneratsii enerhii vid soniachnykh panelei [Online calculator of energy generation from solar panels]. URL: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/) [in Ukrainian].

18. Borychenko, O. V. (2023). Enerhetychnyi menedzhment. Biznes-plan proiektu z enerhoefektyvnosti: rozrakhunkova robota: navch. posibnyk [Energy

10. Дерев'янюк Д. Г., Шовкалюк М. М. Формування soft skills у студентів енергетичних спеціальностей шляхом впровадження у навчальний процес активних методів навчання. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 6 (17). С. 9–20. URL: <https://vistnuk.knutd.edu.ua/wp-content/uploads/sites/2/2024/02/6-2023-1.pdf>.

11. Цареградська К. В. Використання навчально-рольових ігор для розвитку іншомовної комунікативної компетенції студентів-магістрів економічних спеціальностей. *Вісник НТУУ "КПІ"*. 2012. Вип. 1. С. 150–153.

12. Денисюк С. П., Шовкалюк М. М. КПІ на шляху формування енергоефективного суспільства. 25-річний досвід. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 1. С. 7–21.

13. Івасечко О., Дорош Л. SWOT-аналіз енергетичної безпеки України. *Humanitarian Vision*. 2016. Vol. 2, No. 2. P. 25–30.

14. Про затвердження Методики визначення базового рівня енергетичної ефективності: Наказ Мінрегіонбуду від 14.12.2023 № 1140. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0192-24#Text>.

15. ДСТУ-Н Б.В.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія. К. 2011. 127 с.

16. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання: Постанова КМУ від 13 серпня 2024 р. №761-2024-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text>.

17. Онлайн-калькулятор генерації енергії від сонячних панелей. URL: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)

18. Бориченко О.В. Енергетичний менеджмент. Бізнес-план проекту з енергоефективності: розрахункова робота:

management. Business plan of the energy efficiency project: calculation work: Textbook]. Kyiv: KPI im.Ihorra Sikorskoho. 44 p. [in Ukrainian].

навч. посібник. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 44 с.

**LISOVYK VIACHESLAV**

Non-governmental organization «School of Energy Efficiency», Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0000-1544-9597>  
E-mail: [vlisovyk@see.org.ua](mailto:vlisovyk@see.org.ua)

**SHEVCHENKO OLENA**

PhD, Ass. Professor,  
Educational and Scientific Institute of Thermal and Nuclear Power Engineering  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-9304-5432>  
Scopus Author ID: 55839779200  
Researcher ID: AAK-1436-2020  
E-mail: [alenashevchenko@ukr.net](mailto:alenashevchenko@ukr.net)

**SHOVKALIUK MARYNA**

PhD, Ass. Professor  
Educational and scientific institute of energy saving and energy management  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-1898-3493>  
Scopus Author ID: 57220179453  
Researcher ID: K-5822-2017  
E-mail: [madam.mari@gmail.com](mailto:madam.mari@gmail.com)

**<sup>1</sup>LISOVYK V. L., <sup>2</sup>SHEVCHENKO O. M., <sup>3</sup>SHOVKALIUK M. M.**

<sup>1</sup> Non-governmental organization “School of Energy Efficiency”, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Educational and Scientific Institute of Thermal and Nuclear Power Engineering  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup> Educational and scientific institute of energy saving and energy management  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

**INCREASING THE CAPACITY OF COMMUNITIES IN RECOVERY PROJECTS  
THROUGH ENERGY EFFICIENCY TRAINING**

**Introduction.** One of the challenges for Ukraine in the current conditions is the quick and professional implementation of reconstruction projects in territorial communities affected by military aggression. In addition, our state has international obligations in the field of energy and environmental security, therefore recovery is inextricably linked with energy efficiency improvement projects and the development of energy management systems. Thus, municipalities need qualified specialists with relevant knowledge and competences.

**Purpose.** Increasing the capacity of cities to participate in restoration projects by developing the competences of specialists of territorial communities in matters of planning and implementation of energy-efficient projects. Development of the capacity of communities to achieve climate neutrality and dissemination of experience gained in the development and implementation of energy-efficient projects within the framework of the recovery of Ukraine.

**Methodology.** The research included interviewing specialists of territorial communities, performing an analysis of their needs and further drawing up a training program. During the training, active methods were used, which develop both professional skills for solving specialized tasks of managing and supporting projects during the life cycle (“hard skills”), and extra-professional competencies (“soft skills”). The following research methods were used: SWOT analysis, technical and economic analysis, modeling, a systematic approach to project management taking into account the life cycle.

**Findings.** recommendations and document templates for the creation of a project implementation group were developed, a training program for municipal specialists was developed, which includes lectures,

practical exercises, individual and group tasks, interactive business games, testing, independent work, exchange of experience. Organized training for representatives of territorial communities; as part of the implementation of an "end-to-end" independent task, technical and economic feasibility studie) were developed for 12 communally owned buildings.

**Originality.** Based on the analysis of community needs, topics for training were formulated and a training program was developed for groups implementing energy efficiency improvement projects in Ukrainian cities. The procedure and recommendations for conducting group and individual practical exercises, business games, and performing independent tasks according to the recommended template are formulated. All this contributes to the development of the competences of specialists of territorial communities in matters of planning and implementation of restoration projects, which are inextricably linked with the issues of increasing energy efficiency and energy sustainability of cities.

**Practical value.** Different methods of active learning have been developed, adapted for territorial communities and implemented. Recommendations for the creation of a group for the implementation of demo projects, forms of questionnaires for collecting initial information, templates of necessary documents for the implementation of projects (feasibility study, technical tasks for three types of projects (SPP roof/ground, introduction of frequency-regulated electric drive), forms for monitoring, check sheets.

**Keywords:** energy efficiency improvement projects; urban renewal projects; technical and economic justification; energy management; professional competences.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.5.7>

УДК 621.73

<sup>1</sup>ПУЗИРЬОВ О. Л., <sup>2</sup>ГРЕЧКА А. І.

<sup>1</sup> Економіко-технологічний інститут імені Роберта Ельворті, Кропивницький, Україна

<sup>2</sup> Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ВОЛОЧИЛЬНОГО СТАНУ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ЗАГОТОВОК З МЕТАЛОПРОКАТУ ДЛЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПК

**Метою** дослідження є оцінка доцільності використання волочильного стану HSLB-15 для оптимізації підготовки металопрокату, забезпечення високої точності заготовок і зменшення залежності від постачальників. Це рішення актуальне через необхідність підвищення ефективності виробництва, зниження витрат і забезпечення стабільної якості металопрокату, що є ключовим для виготовлення високоточних деталей у машинобудуванні.

**Методика.** У рамках дослідження було проведено аналіз поточних виробничих процесів для виявлення проблем нестабільності якості металопрокату, що негативно впливає на кінцеву продукцію. Оцінено вплив нової технології на економічні показники підприємства та проведено аналіз змін у витратах на сировину.

**Результати.** Аналіз виробничих процесів виявив, що головною проблемою є нестабільна якість металопрокату від постачальників, що спричиняє збільшення витрат і погіршення точності кінцевої продукції. Впровадження волочильного стану HSLB-15 дозволяє стабілізувати якість заготовок, зменшити кількість браку та оптимізувати виробничі процеси. Завдяки новій технології вдалося суттєво скоротити витрати на підготовку металопрокату, знизити залежність від зовнішніх постачальників і мінімізувати додаткові операції з обробки матеріалу. Економічна ефективність була підтверджена: зменшення витрат на сировину та підвищення якості заготовок сприяють зростанню конкурентоспроможності підприємства. Дослідження показало, що використання волочильного стану HSLB-15 забезпечує високу точність заготовок для токарних верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК), що важливо для виробництва високоточних деталей.

**Наукова новизна.** Вперше продемонстровано ефективність застосування волочильного стану HSLB-15 для стабілізації якості металопрокату та економічної оптимізації виробничих процесів у машинобудуванні.

**Практична значимість.** Запровадження технології забезпечує стабільність виробництва, зменшує витрати, покращує якість кінцевої продукції та посилює конкурентні позиції підприємства на ринку.

**Ключові слова:** металопрокат; оптимізація виробництва; економічна ефективність; зниження витрат; якість продукції; технології.

**Вступ.** Підприємство, що є об'єктом дослідження, спеціалізується на виробництві високоякісних комплектуючих для машинобудування, та є важливим учасником машинобудівної галузі України. З огляду на високі вимоги до якості продукції та постійне оновлення верстатного парку, підприємству необхідно підвищити якість металопрокату, що використовується в якості заготовок для обробки на верстатах з ЧПК. Нестабільна якість металопрокату та велика залежність від постачальників негативно впливають на кінцеву якість продукції, що, в свою чергу, позначається на економічних показниках підприємства. Впровадження лінії комбінованого волочильного стану HSLB-15 дозволить знизити ці ризики, забезпечити стабільність якості металопрокату та зменшити витрати на додаткову сировину, що матиме позитивний вплив на ефективність підприємства. Впровадження цієї технології дозволить підвищити точність підготовки металу для подальшої обробки на верстатах з ЧПК, що сприятиме покращенню конкурентоспроможності продукції на ринку. Таким чином,

запропоноване рішення є важливим для підвищення стабільності виробничого процесу та забезпечення високої якості продукції, що є необхідним для підтримання конкурентоспроможності підприємства в умовах сучасного ринку.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Аналіз проблеми холодного волочіння металу для підготовки металопрокату, викладений у джерелах [1–3], підкреслює важливість забезпечення високої якості металопрокату для подальшої обробки. Багато досліджень акцентують увагу на тому, що нестабільність якості металопрокату є одним із основних чинників, які впливають на кінцеву якість продукції. Особливо це стосується підприємств, що працюють із металопрокатом для машинобудівної галузі, де велика залежність від постачальників призводить до збільшення витрат і тривалості обробки.

У низці публікацій [4–7] розглядається проблема якості металопрокату, що ускладнює його подальшу обробку. Це, у свою чергу, може призвести до зниження точності виготовлення деталей, зокрема при виробництві складних компонентів для верстатів з ЧПК. Автори зазначають, що на підприємствах, де відсутній належний контроль за якістю прокату, виникають відхилення в геометричних характеристиках, що значно ускладнює використання металу для високоточних робіт.

Аналіз досліджень, що стосуються впровадження нових технологій у виробництво [8–10], показує, що сучасні волочильні агрегати можуть значно знизити витрати на додаткову сировину, що є важливим фактором для підприємств, що працюють із металопрокатом. Оцінка економічної ефективності свідчить, що їх використання дозволяє зменшити витрати на закупівлю сировини та знижує собівартість продукції, що є важливим для забезпечення фінансової стабільності підприємства.

Враховуючи вищезазначене, дослідження вказують, що проблеми з якістю металопрокату та залежністю від постачальників можуть бути успішно вирішені через впровадження інноваційних технологій. Однією з таких інновацій є використання комбінованих волочильних станів. Це дозволить підвищити стабільність якості прокату, знизити витрати на додаткову сировину та покращити економічні показники підприємства. Запровадження таких технологій має суттєве значення для підвищення конкурентоспроможності продукції на ринку та ефективності виробничих процесів.

**Мета, завдання дослідження.** Зважаючи на необхідність підвищення ефективності технологічних процесів, однією з ключових проблем є оптимізація процесів підготовки металопрокату для подальшого використання у виробництві, зокрема для обробки на верстатах з ЧПК. Оскільки холодне волочіння металу є критично важливим етапом, який забезпечує необхідні геометричні та фізико-механічні характеристики прокату, важливо впроваджувати інноваційні підходи до цієї технології. У зв'язку з цим метою дослідження є обґрунтування впровадження комбінованого волочильного стану HSLB-15 для підвищення якості металопрокату, зниження витрат на його підготовку та покращення економічної ефективності підприємства.

Завдання дослідження включають: аналіз існуючих методів підготовки металопрокату на підприємстві; оцінку технічних та економічних характеристик запропонованого волочильного стану HSLB-15; розрахунок економічної ефективності впровадження стану та визначення економії на випуск; розробку рекомендацій щодо оптимізації процесу підготовки металопрокату.

**Матеріал, результати досліджень.** Матеріалом дослідження є металопрокат (круглий профіль Ø14–30 мм, сталі Ст20, Ст35, Ст40, Ст40X), який споживається підприємством у кількості близько 400 тон на рік. Дослідження охоплює аналіз витрат на виробництво та економічну доцільність впровадження сучасного волочильного стану, що дозволяє покращити технологічні процеси та знизити витрати підприємства.

На основі запропонованої технології проведемо розрахунки ефективності управління інноваційними технологіями, які демонструють зменшення залежності від постачальників металопрокату, підвищення якості заготовок з металопрокату, що відповідають технічним нормам для верстатів із ЧПК, та зниження собівартості продукції.

**Практична частина дослідження.** Підприємство, що обрано в якості об'єкту дослідження використовує у своєму виробництві біля 400 тон на рік прокату круглого профілю, переважно діаметрами від 14мм до 30 мм включно по квалітетах h11 та h9. (Ст20, Ст35, Ст40 та Ст40х), гарячекатаний та калібрований у співвідношенні 60% на 40% відповідно. Враховуючи те, що парк обладнання підприємства, що досліджується постійно оновлюється верстатами з ЧПК, та на кінець 2024 р. він складає 90% всього верстатного парку, тому і вимоги до форми та кривизни заготовки досить високі.

Наразі гарячекатаний прокат, що використовується на підприємстві, характеризується низькою та нестабільною якістю, що суттєво впливає на якість кінцевої продукції та призводить до зростання витрат на закупівлю додаткової сировини. Крім того, це створює відчутну залежність від постачальника.

У той же час калібрований прокат підвищеної якості (h9) відповідає технічним вимогам та характеристикам обладнання, однак його висока вартість значно збільшує витрати виробництва.

З огляду на зазначені чинники, доцільним є впровадження на підприємстві лінії комбінованого волочильного стану HSLB-15, яка забезпечить повну підготовку металопрокату для токарних верстатів із ЧПК. Такий крок сприятиме підвищенню якості продукції, зменшенню витрат і зниженню залежності від зовнішніх постачальників.

Проведемо оцінку ефективності управління впровадженням інноваційних технологій на підприємстві. У рамках аналізу враховуватимуться поточні обсяги споживання металопрокату на підприємстві, яке досліджується.

Для цього були проведені наступні розрахунки:

Середня пропускна потужність визначається за формулою:

$$N_m = k_m \cdot N, \quad (1)$$

де  $k_m$  – кількість хвилин у зміні;  $N$  – середня продуктивність, од/хв;

$$N_m = 1,21 \cdot 35 = 42,27 \text{ кг/хв.}$$

Максимальна продуктивність за зміну розраховується за формулою:

$$N_{m.max} = k_m \cdot N_{max}, \quad (2)$$

де  $N_{max}$  – максимальна пропускна потужність, од/хв;

$$N_{m.max} = 1,21 \cdot 50 = 60,39 \text{ кг/хв.}$$

Норма робочого часу визначається приблизно – 85% від норми часу в рік, з урахуванням тривалості простою. Вартість технологічного обладнання являє собою:

$$K_r = K_o \cdot K_{нбу}, \quad (3)$$

де  $K_o$  – вартість обладнання, дол. США;  $K_{нбу}$  – курс НБУ, дол. США.

За результатами розрахунків отримано вихідні дані щодо підготовки металопрокату, які наведено в табл. 1.

Для визначення економії при впровадженні нового агрегату були проведені наступні розрахунки:

Вартість послуги (змінні) визначається з наступного виразу:

$$K_{\pi} = \frac{N \cdot 60 \cdot N_m}{P} + \frac{C_{30} \cdot 12}{T_p} / (N \cdot k_m), \quad (4)$$

де  $P$  – Потужність обладнання; кВт/год;  $C_{30}$  – заробітна плата, грн/міс;  $T_p$  – норма робочого часу, год/рік.

$$K_{\pi} = \frac{35 \cdot 60 \cdot 1,21}{160} + \frac{10\,000 \cdot 12}{1\,695} / (35 \cdot 1,21) = 1,95, \text{ грн.}$$

Вартість послуг (змінні витрати) складає 1,95 грн. Це важливий показник для визначення витрат на підготовку матеріалів.

Таблиця 1

**Вихідні дані щодо використання різних типів металопродукту на підприємстві**

Показник	Матеріал: круг				
	Ø14 г/к сталь 20	Ø18г/к сталь 20	Ø24г/к сталь 20	Ø25г/к сталь 40X	Ø30 кал. сталь 40
Оскол, в бунті (за 1 кг), грн без ПДВ	27,79	27,79	26,96	28,25	26,96
Україна, калібрований (за 1 кг), грн без ПДВ	31,68	31,68	31,68	34,10	34,94
Обсяг споживання підприємством, кг/рік	36 477	112 592	52 962	44 535	129 728
Тариф ел/енергія, грн. без ПДВ	4,3				
Коефіцієнт перекладу, /кг	1,21	2,00	3,55	3,85	6,31
Середня пропускна потужність, м/хв.	35				
Середня пропускна потужність, кг/хв.	42,27	69,99	124,23	134,80	220,85
Максимальна пропускна потужність, м/хв	50				
Максимальна пропускна потужність, кг/хв	60,39	99,98	177,48	192,57	315,50
Потужність обладнання, кВт/год	160				
З/плата, грн/міс	10 000				
Норма робочого часу, год/рік	1 695				
Вартість обладнання, дол. США	565 730				
Вартість обладнання, грн без ПДВ	15 373 090				
Термін амортизації, міс.	84				

Вартість підготовленого металу визначається як:

$$K_M = K_{\pi} + C_{\text{оскол}}, \quad (5)$$

де  $K_{\pi}$  – вартість послуги (змінні), грн;  $C_{\text{оскол}}$  – оскол, в бунті (за 1 кг), грн.

$$K_M = 1,95 + 27,79 = 29,73, \text{ грн.}$$

Вартість підготовленого металу становить 29,73 грн. Це дозволяє порівняти ціни на підготовлений метал з ринковими цінами.

Вартість підготовленого металу порівнюємо з вартістю металопродукту на ринку України й визначаємо економію за формулою:

$$E_m = C_{\text{калібр}} - C_M, \quad (6)$$

де  $C_{\text{калібр}}$  – калібрований метал (за 1 кг), Україна, грн;  $C_M$  – вартість підготовленого металу, грн.

$$E_m = 31,68 - 29,73 = 1,95, \text{ грн/кг.}$$

Розраховуємо економію на випуск:

$$E_p = E_m \cdot C_{об}, \quad (7)$$

де  $C_{об}$  – обсяг споживання підприємством, кг/рік.

$$E_p = 1,95 \cdot 36\,477 = 71\,015,16, \text{ грн/рік.}$$

Економія на випуск складає 71 015,16 грн/рік. Це свідчить про те, що перехід на підготовлений метал дозволить зменшити витрати на закупівлю сировини.

Розраховуємо термін окупності інвестиційних вкладень:

$$T_o = \frac{K_r}{E_p}, \quad (8)$$

де  $K_r$  – вартість обладнання, грн.

$$T_o = \frac{15\,373\,090}{1\,812\,144,33} = 8,48 \text{ років.}$$

Термін окупності інвестицій складає 8,48 років. Це означає, що через цей період підприємство покриває витрати на придбання нового обладнання за рахунок економії.

Отримані результати наведено в табл. 2.

Таблиця 2

**Аналіз економії та ефективності підготовки металопрокату для виробничих потреб підприємства**

Показник	Круг Ø 14 г/к сталь 20	Круг Ø 18 г/к сталь 20	Круг Ø 24 г/к сталь 20	Круг Ø 25 г/к сталь 40X	Круг Ø 30 г/к калібр. сталь 40	Сумарні значення
Вартість послуги (змінні), грн без ПДВ	1,95	1,18	0,66	0,61	0,37	
Вартість підготов- леного металу, грн без ПДВ	29,73	28,96	27,62	28,86	27,33	
Економія, грн/кг	1,95	2,72	4,06	5,24	7,61	
Економія на випуск, грн/рік	71 015,16	305 963,01	215 026,65	233 468,60	986 670,90	1 812 144,33
Економія, %	6,1%	8,6%	12,8%	15,4%	21,8%	
Термін окупності та інвестицій, років	8,48					

Таким чином, проведений аналіз показав, що продуктивність нового обладнання демонструє значний потенціал, з середньою пропускною потужністю 42,27 кг/хв і максимальною – 60,39 кг/хв. Це дозволяє підприємству обробляти матеріали на високому рівні, відповідно до вимог до обсягів виробництва, забезпечуючи стабільний і безперебійний процес обробки. Така продуктивність дозволяє задовольняти навіть високі вимоги до кількості обробленого металу в одиницю часу.

Вартість обладнання, яка становить 15 373 090 грн, є значною інвестицією для підприємства, але при цьому є важливим елементом для досягнення зростання виробничих потужностей. Вартість послуг, що складає 1,95 грн за одиницю, а також вартість підготовленого металу, яка становить 29,73 грн, дозволяє підприємству ефективно планувати

витрати, пов'язані з виробничим процесом, забезпечуючи економічну доцільність інвестицій у нові технології.

Економія на випуску металу, яка становить 71 015,16 грн на рік, є значною вигодою для підприємства, оскільки це дозволяє значно зменшити витрати на сировину та на виробничі процеси. Така економія сприяє підвищенню загальної ефективності підприємства і забезпечує додаткові фінансові можливості для розвитку інших напрямків діяльності.

Термін окупності інвестицій у нове обладнання складає 8,48 років. Це означає, що підприємство може планувати повернення своїх інвестицій на протязі прийнятнього часу, що є важливим показником для довгострокового планування та стратегічного розвитку. Враховуючи вищезгадані переваги, цей термін є економічно обґрунтованим і забезпечує стабільність у процесі відновлення інвестицій.

Загалом, проведені розрахунки демонструють, що інвестиція в нове обладнання є економічно вигідною. Вона дозволяє не тільки знизити витрати на виробництво, але й підвищити продуктивність, ефективність технологічних процесів і забезпечити підприємству конкурентоспроможність на ринку.

**Висновки.** Впровадження комбінованого волочильного стану HSLB-15 є значним кроком у модернізації виробничих процесів підприємства та сприятиме вирішенню кількох важливих проблем, зокрема низької якості гарячекатаного прокату та високих виробничих витрат. Оцінка результатів показує, що цей агрегат має великий потенціал для підвищення якості продукції та економічної ефективності підприємства.

По-перше, інноваційна технологія, на основі якої працює комбінований волочильний стан HSLB-15, дозволяє забезпечити стабільну якість металопродукату, що повністю відповідає сучасним технічним вимогам. Це є важливим фактором для задоволення вимог споживачів і підвищення репутації підприємства на ринку. Завдяки високоточному контролю процесів та оптимізації параметрів обробки, підприємство отримує більш рівномірний і якісний продукт, що відповідає міжнародним стандартам.

По-друге, економічний ефект від впровадження цього агрегату підтверджує доцільність інвестицій у модернізацію виробничих процесів. Вартість агрегату та витрати на його впровадження швидко окупаються завдяки значному зниженню витрат на енергоносії, підвищенню ефективності виробництва та зменшенню дефектів продукції. Це дозволяє підприємству знижувати виробничі витрати, що є важливим для збереження конкурентоспроможності в умовах сучасного ринку.

По-третє, запропоновані технологічні зміни значно сприятимуть підвищенню конкурентоспроможності підприємства. Завдяки використанню сучасного та ефективного обладнання, підприємство здатне не лише знижувати собівартість продукції, але й покращувати її характеристики, що дозволяє залучати нових клієнтів та зберігати довгострокові партнерські відносини з існуючими. Удосконалення технологічного процесу підвищує здатність підприємства реагувати на зміни попиту та забезпечує більш високу гнучкість в умовах ринкової конкуренції.

Таким чином, впровадження комбінованого волочильного стану HSLB-15 є важливим кроком у розвитку підприємства. Це дозволяє не лише підвищити якість продукції та знизити витрати, але й зміцнити позиції підприємства на ринку, забезпечуючи його економічну стабільність та конкурентоспроможність у довгостроковій перспективі.

## References

1. Sereda, B. P. (2009). *Obrobka metaliv tyskom: navchalnyi posibnyk [Metal forming: textbook]*. Zaporizhzhia: Publishing House of the Zaporizhzhia State Engineering Academy. 344 p. [in Ukrainian].

## Література

1. Серєда Б. П. *Обробка металів тиском: навчальний посібник*. Запоріжжя: Видавництво Запорізької державної інженерної академії, 2009. 344 с.

2. Danchenko, V. M., Hrynkevych, V. O., Holovko, O. M. (2008). Teoriia protsesiv obrobky metaliv tyskom: pidruchnyk [Theory of metal forming processes: textbook]. Dnipropetrovsk: Porohy. 370 p. [in Ukrainian].
3. Spivak, O. Yu., Melnyk, I. H., Humeniuk, V. S. (1994). Tonki termoparni droty: Rozrobka tekhnolohichnykh rezhymiv volochinnia ta doslidzhennia yikh vplyvu na termoelektrychni vlastyvoli splaviv khromel i kopel [Thin thermocouple wires: Development of drawing technological regimes and investigation of their influence on the thermoelectric properties of chromel and copel alloys]. Vinnytsia. 20 p. [in Ukrainian].
4. Vasylev, Ya. D., Minayev, O. A. (2009). Teoriia pozdovzhnoi prokatky: pidruchnyk [Theory of longitudinal rolling: textbook]. Donetsk: UNITEKH. 488 p. [in Ukrainian].
5. Suslikov, L. M., Studeniak, I. P. (2016). Neruivivni metody kontroliu: navchalnyi posibnyk [Non-destructive testing methods: textbook]. Uzhhorod: UzhNU Publishing House. 192 p. [in Ukrainian].
6. Arhat, R. H., Drahobetskyi, V. V., Puzyr, R. H., Shchetinin, V. T. (2020). Utochnennia analitychnykh zalezhnosti dlia vyznachennia napruzhen pid chas vytyahuvannia tsylindrychnykh detalei [Refinement of analytical dependencies for determining stresses during the stretching of cylindrical parts]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhayla Ostrohradskoho = Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradsky National University*, Vol. 5–6 (124–125), P. 119–127 [in Ukrainian].
7. Dolzhanskyi, A. M., Maksakova, O. S., Chornoivanenko, K. O., Aiupova, T. A., Poliakova, N. V., Bondarenko, O. A., Lomov, I. M. (2023). Tekhnichne rehuliuвання ta kontrol na pidpriemstvi: pidruchnyk [Technical regulation and control at the enterprise: textbook]. Dnipro: Svidler A.L. Vol. 2: Tekhnologii ta defekty produktsii metalurhii [Technologies and defects of metallurgical products]. 632 p. [in Ukrainian].
8. Ivanchenko, F. K. (1995). Rozrakhunok mashyn i mekhanizmiv prokatnykh tsekhiv: navchal. posib. dlia stud. vyshch. navch. zakl. [Calculation of machines and mechanisms of rolling mills: textbook for students of higher educational institutions]. Kyiv: Vyshcha shkola. 454 p. [in Ukrainian].
9. Dolzhanskyi, A. M., Zhadan, A. O., Lomova, O. B., Lomov, I. M. (2011). Sumisne bezfilierne ta filierne volochinnia stalevoi nyzkovuhletsevoi katanky – perspektyvnyi shliakh rozvytku tekhnologii vyrobnystva droty [Combined non-die and die drawing of low-carbon steel wire rod: A promising way to develop wire production technologies]. *Metallurhichna ta hirnychorudna promyslovisť = Metallurgical and mining industry*, Dnipropetrovsk, Vol. 7, P. 181–184 [in Ukrainian].
2. Данченко В. М., Гринкевич В. О., Головка О. М. Теорія процесів обробки металів тиском: підручник. Дніпропетровськ: Пороги, 2008. 370 с.
3. Співак О. Ю., Мельник І. Г., Гуменюк В. С. Тонкі термопарні дроти: розробка технологічних режимів волочіння та дослідження їх впливу на термоелектричні властивості сплавів хромель і копель. Вінниця, 1994. 20 с.
4. Василев Я. Д., Мінаєв О. А. Теорія поздовжньої прокатки: підручник. Донецьк: УНІТЕХ, 2009. 488 с.
5. Сусліков Л. М., Студеняк І. П. Неруйнівні методи контролю: навчальний посібник. Ужгород: Видавництво УжНУ, 2016. 192 с.
6. Аргат Р. Г., Драгобецький В. В, Пузир Р. Г., Щетинин В. Т. Уточнення аналітичних залежностей для визначення напружень під час витягування циліндричних деталей. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2020. Вип. 5–6 (124–125). С. 119–127.
7. Должанський А. М., Максакова О. С., Чорноіваненко К. О., Аюпова Т. А., Полякова Н. В., Бондаренко О. А., Ломов І. М. Технічне регулювання та контроль на підприємстві: підручник. Дніпро: Свідлер А.Л., 2023. Т. 2: Технології та дефекти продукції металургії. 632 с.
8. Іванченко Ф. К. Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Київ: Вища школа, 1995. 454 с.
9. Должанський А. М., Жадан А. О., Ломова О. Б., Ломов І. М. Сумісне безфільтрне та фільтрне волочіння сталеві нязьковуглецевої катанки – перспективний шлях розвитку технологій виробництва дроту. *Металургічна та гірничорудна промисловість*. Дніпропетровськ, 2011. № 7. С. 181–184.

10. Sereda, B. P., Pryshchup, M. H. (2008). Ustakhovaniie tsekhiv OMT: navchal. posib. dlia stud. vyshch. navch. zakl. [Equipment of OMT shops: textbook for students of higher educational institutions]. Zaporizhzhia: ZDIA. 129 p. [in Ukrainian].

10. Серєда Б. П., Прищип М. Г. Устаткування цехів ОМТ: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя: ЗДІА, 2008. 129 с.

**PUZYROV OLEKSANDR**

PhD in Technical Sciences, Head of the Department of Applied Mechanics, Economic-Technological Institute named after Robert Elvorti, Kropyvnytskyi, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-2158-3714>  
E-mail: [alpu@i.ua](mailto:alpu@i.ua)

**HRECHKA ANDRIY**

PhD in Technical Sciences, Head of the Department of Mechanical Engineering, Mechatronics, and Robotics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-1188-7412>  
E-mail: [angre17@ukr.net](mailto:angre17@ukr.net)

**<sup>1</sup>PUZYROV O. L., <sup>2</sup>HRECHKA A. I.**

<sup>1</sup> Economic-Technological Institute named after Robert Elvorti, Kropyvnytskyi, Ukraine

<sup>2</sup> Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

**ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF IMPLEMENTING THE DRAWING STATE FOR THE PREPARATION OF METALWORKING BLANKS FOR MACHINES WITH CNC**

**Purpose.** The aim of the study is to evaluate the feasibility of using the HSLB-15 drawing line to optimize the preparation of rolled metal, ensure high accuracy of blanks, and reduce dependence on suppliers. This solution is relevant due to the need to increase production efficiency, reduce costs, and ensure the stable quality of rolled metal, which is critical for the manufacture of high-precision components widely used in mechanical engineering.

**Methodology.** The study involved an analysis of current production processes to identify problems with the instability of rolled metal quality, which adversely affects the final products. The impact of the new technology on the economic performance of the enterprise was assessed, along with changes in raw material costs.

**Findings.** The analysis of production processes revealed that the primary issue lies in the inconsistent quality of rolled metal provided by suppliers, which leads to increased costs and diminished accuracy of the final products. The implementation of the HSLB-15 drawing line enables the stabilization of blank quality, reduction in material waste, and optimization of production processes. The new technology significantly reduces costs associated with metal preparation, decreases reliance on external suppliers, and minimizes additional material processing operations.

Economic efficiency has been confirmed: cost reductions in raw materials and improved blank quality contribute to enhancing the enterprise's competitiveness. The study demonstrated that the use of the HSLB-15 drawing line ensures high accuracy of blanks for CNC lathes, which is essential for manufacturing high-precision components.

**Originality.** For the first time, the effectiveness of implementing the HSLB-15 drawing line for stabilizing the quality of rolled metal and optimizing the economic aspects of production processes in mechanical engineering has been demonstrated.

**Practical value.** The introduction of this technology ensures production stability, reduces costs, improves the quality of final products, and strengthens the competitive positions of the enterprise in the market.

**Keywords:** rolled metal; production optimization; economic efficiency; cost reduction; product quality; technology.

УДК 677.074/  
076

<sup>1</sup>ТРУБА А. А., <sup>1</sup>СВИДЛО О. С., <sup>1</sup>АРАБУЛІ С. І.,  
<sup>1</sup>АРАБУЛІ А. Т., <sup>2</sup>КОВТОНЮК Л. М.

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

<sup>2</sup>Житомирський технологічний фаховий коледж КНУБА, Україна

## ВПЛИВ БАГАТОРАЗОВОГО ПРАННЯ НА ОПТИЧНІ ТА ЕКРАНУЮЧІ ВЛАСТИВОСТІ БАВОВНЯНИХ ТКАНИН

**Мета.** Для виготовлення одягу літнього асортименту найчастіше використовуються бавовняні тканини. Такі тканини мають забезпечити естетичні показники, високий комфорт носіння та захист від негативного впливу ультрафіолетового (УФ) випромінювання. В той же час, вироби з цих тканин піддаються частим пранням, що негативно впливає на зовнішній вигляд одягу та його екрануючі властивості.

**Методика.** Теоретичні та експериментальні дослідження базуються на основних положеннях текстильного матеріалознавства. Оптичні властивості тканин оцінювались в кольоровому просторі Commission Internationale de l'Eclairage  $L^*a^*b^*$  (CIELab) колориметром 3NH NR-20XE при випромінюванні D-65/10. Здатність тканин екранувати УФ-випромінювання оцінювалася за значеннями коефіцієнта пропускання (%) на UV-Vis спектрофотометрі DU-8800D (Drawell International Technology Ltd) відповідно до стандарту EN 13758-1:2002 з визначенням коефіцієнту захисту від ультрафіолету (UPF).

**Результати.** Проаналізовано сучасні заходи для захисту людини від УФ випромінювання. Встановлено, що одяг вважається одним з найефективніших засобів захисту шкіри людини від УФ, при цьому екрануючі властивості текстилю є визначальними. Досліджено вплив основних показників текстилю (хімічний склад волокна, пористість та колір) на рівень захисту 8 досліджених полотен від УФ випромінювання. Досліджено вплив багаторазового прання на оптичні та екрануючі властивості бавовняних тканин.

**Наукова новизна.** Експериментально доведено, що багаторазове прання бавовняних тканин призводить до видимих змін у оптичних та структурних властивостях полотен. Встановлено, що найбільш інформативним параметром для встановлення ефекту «циклів прання» на оптичні (колір) та екрануючі властивості є параметр  $L^*$  – світлота. Одержані дані підтверджують гіпотезу, про те, що зменшення значення параметру  $L^*$  призводить до зниження значення коефіцієнту пропускання УФ випромінювання (коефіцієнт кореляції становить 0,9).

**Практична значимість.** Узагальнено вплив структурних та оптичних властивостей текстильних матеріалів на здатність останніх екранувати УФ випромінювання. Встановлені залежності між оптичними та екрануючими властивостями бавовняних тканин за результатами впливу багаторазового прання.

**Ключові слова:** бавовна; текстиль; захист; електромагнітне випромінювання; УФ випромінювання; оптичні властивості; колір; багаторазове прання.

**Вступ.** Вплив випромінювання залежить від його довжини хвилі. Енергія випромінювання обернено пропорційна довжині хвилі, тобто із зменшенням довжини хвилі енергія зростає. У випадку з УФ випромінюванням ця тенденція зберігається: УФ випромінювання з найкоротшою довжиною хвилі має найвищий руйнівний потенціал для живих організмів. Це наочно ілюструє УФ-В випромінювання з довжиною хвилі 300 нм, яке приблизно в 600 разів біологічно ефективніше руйнує тканини ока, ніж УФ-А випромінювання з довжиною хвилі 325 нм. При цьому, чим довша хвиля, тим глибше в живу тканину може проникати випромінювання. Таким чином, глибина пошкоджень визначається довжиною хвилі (жорсткістю) УФ випромінювання, тривалістю, інтенсивністю та площею впливу.

Атмосферний озоновий шар є природним захисним бар'єром від найбільш патогенного УФ випромінювання, затримуючи небезпечний УФ-С спектр, не пропускаючи його до

поверхні Землі. Концентрація озону у верхніх атмосферних шарах різниться залежно від місця, пори року і доби і визначає, який відсоток УФ-В і УФ-А променів досягає поверхні Землі. Стоншення озонового шару призвело до того, що до поверхні Землі стало проходити більше УФ-променів. За оцінками вчених до 2050 р. внаслідок заборони широкого застосування хлорфторвуглецю (аерозолів у балончиках) озоновий шар має значною мірою відновитися. Але проблема захисту організму людини від негативної дії УФ випромінювання спектра УФ-А та УФ-В залишається актуальною, особливо в літню пору року. За результатами попередніх досліджень, оформлених в національних та міжнародних рекомендаціях, виділено 5 основних заходів для захисту людини від УФ випромінювання [1]:

- використання одягу, який максимально покриває поверхню тіла людини;
- використання сонцезахисного крему з SPF 30+;
- використання головних уборів, які максимально закривають поверхню голови та шиї;
- знаходження в тіні;
- використання сонцезахисних окулярів.

Одяг можна вважати одним з найважливіших засобів захисту шкіри людини від УФ. Ефективність захисту одягу може бути оцінена за показниками: властивості текстилю та конструкція одягу.

УФ випромінювання, що проходить через текстиль, складається з хвиль, які безпосередньо проходять через пори тканини, і розсіяних хвиль, які взаємодіють із структурними елементами тканини [2]. Показник, який фактично характеризує здатність текстилю блокувати УФ випромінювання у діапазоні УФ-А і УФ-В є, так званий, коефіцієнт захисту від УФ випромінювання (UPF). Вище значення коефіцієнту UPF вказую на більш ефективне екранування УФ випромінювання [3]. Таким чином, тільки текстиль зі значенням UPF від 40 до 50+ може бути класифікований і віднесений до текстилю з відмінним захистом від УФ випромінювання. Виходячи з цього критерію, всі ТМ з рейтингом UPF 10, класифікуються як непридатні для верхнього одягу з носінням на відкритому повітрі.

За даними попередніх досліджень [4, 5] основними показниками текстилю, які впливають на рівень захисту від УФ випромінювання, є: хімічний склад волокон; щільність переплетення; колір; розтягнення; вологість; оздоблення.

Традиційно бавовняний одяг є найпопулярнішим одягом влітку, коли захист від УФ випромінювання є найбільш затребуваний. Використання бавовняного текстилю в одязі для літа зумовлено високими естетичними (різноманіття кольорового оздоблення) та гігієнічними властивостями останнього, що забезпечує оптимальний комфорт носіння. В той же час, вироби з бавовняних тканин піддаються частим пранням, що негативно впливає на зовнішній вигляд тканин (оптичні властивості) та їх здатність захищати тіло людини від негативної дії УФ випромінювання.

Враховуючи вище викладене, метою дослідження є встановлення впливу оптичних та експлуатаційних властивостей бавовняних тканин на їх екрануючу здатність щодо дії УФ випромінювання.

**Постановка завдання.** Нефарбовані або вибілені тканини забезпечують набагато нижчий захист від УФ випромінювання порівняно з пофарбованими тканинами. Барвники реагують як добавки; вони підвищують здатність захисту від УФ [6]. У процесі відбілювання видаляються природні пігменти, які діють як поглиначі УФ випромінювання, що впливає на здатність бавовняних тканин поглинати УФ [7]. Серед дослідників існує гіпотеза про те, що відтінок барвника відповідає за захист тканини від УФ, але це є предметом обговорення. Так, в роботі [8] вивчався вплив чотирнадцяти прямих барвників на рівень UPF бавовняних тканин. Встановлено, що колір (відтінок) не пов'язаний з UPF: тканини, пофарбовані барвником

(червоний 28, червоний 24, червоний 80), мали однаковий відтінок і при однаковій концентрації мали різні значення UPF. Крім того, чорна тканина в цьому дослідженні не мала найвищого значення UPF, незважаючи на загально визнаний факт, що більш темні кольори (такі як чорний, темно-синій, темно-зелений, червоний) на тканині одного типу поглинають УФ випромінювання сильніше, ніж світлі пастельні відтінки [9, 10]. Wilson та ін. [7] дійшли висновку, що чорні тканини зазвичай пропускають на 20% менше УФ випромінювання, у порівнянні з ідентичною тканиною білого кольору. В іншій роботі [10] досліджували взаємозв'язок між коефіцієнтом пропускання УФ випромінювання (%) та кольором. Було встановлено, що глибина кольору, а не колір як такий, є основною характеристикою кольору, який впливає на пропускання УФ випромінювання. Найкращий опис зв'язку між кольором і пропусканням УФ випромінювання забезпечили компоненти  $L^*$  і  $b^*$  системи LAB. Робота [11] присвячена дослідженню впливу структури та кольору бавовняних тканин, фарбованих прямими барвниками (червоний, синій морський і чорний), вибілених та з природним пігментом (брудно-білий). Порівняння UPF тканин однакової конструкції, але різного кольору проводилося для тканин полотняного, саржевого та сатинового переплетення та за трьома різними рівнями щільності тканини ( $55\% \div 65\%$ ,  $65\% \div 75\%$ ,  $75\% \div 85\%$ ). Для сатинових і саржевих тканин з високою щільністю ткацтва, де вплив відкритої пористості зведено до мінімуму, результати показують, що всі фарбовані тканини мають чудовий захист від ультрафіолету ( $UPF = 1000$ ), а тканини сатинового переплетення з природним пігментом мали  $UPF = 50$ .  $UPF$  вибіленої сатинової тканини становив 15. Компонент  $L^*$  кольору тканини був приблизно 93, 86, 44, 31 і 17 для білої, брудно-білої, червоної, синьої морської та чорної тканин відповідно. Попередня гіпотеза про те, що значення  $L^*$  для фарбованих тканин має бути менше 38 для створення тканини з хорошим захистом від УФ променів, не працює у випадку з білою сатиною тканиною, де  $L^* = 93$ , а тканина продемонструвала хороший захист від УФ. Також результати показали, що не встановлено достовірних відмінностей в значеннях UPF між червоними, синіми та чорними тканинами саржевого та сатинового переплетення. При цьому, в значеннях UPF була величезна різниця між вибіленими тканинами з одного боку та кольоровими тканинами з іншого. Загальний висновок цього дослідження полягає у тому, що на значення UPF бавовняних тканин, фарбованих прямими барвниками, впливають компоненти кольору ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ), щільність тканини та тип переплетення.

**Матеріали та методи досліджень.** Як об'єкти дослідження були обрані 8 бавовняних тканин полотняного переплетення з поверхневою густиною  $120 \text{ г/м}^2$ , товщиною 0,37 мм, числом ниток на 100 мм: по основі – 300, по утку – 200, поверхневою пористістю – 30,3%. Тканини відрізнялися кольором. Оптичні та екрануючі властивості полотен досліджувалися до та після 1, 5, 20 циклів прання. Зміна структурних характеристик текстильних матеріалів після 5 та 20 циклів прання наведені в табл. 1.

Оптичні властивості тканин оцінювались в кольоровому просторі Commission Internationale de l'Éclairage  $L^*a^*b^*$  (CIE Lab) колориметром 3NH NR-20XE при випромінюванні D-65/10. Система CIE Lab – це кольоровий простір хроматичних значень, що дозволяє вимірювати значення та насиченість за трьома координатами (рис. 1) [12]:

- $L^*$  – насиченість білого кольору, що вимірюється від чорного (0) до білого (100);
- $a^*$  – колір у координатах червоного ( $a^* > 0$ ) та зеленого ( $a^* < 0$ );
- $b^*$  – колір у координатах жовтого ( $b^* > 0$ ) та синього ( $b^* < 0$ ).

Диференційований аналіз загального колірною розходження 8 гладкофарбованих бавовняних тканин полотняного переплетення до та після 20 циклів прання, у системі CIE Lab проводився за наступними колориметричними показниками [12]:

- хроматичність (насиченість) кольору:  $C = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2}$ ;
- відтінок кольору (колірний тон):  $H = \arctg(a^*/b^*)$ ;

- світлота:  $L^* = 25 \left[ 100(y/y_0)^{1/3} \right] - 16$ ;
- кольорова різниця (різниця кольорового тону):  $\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$ .

Таблиця 1

**Зміна структурних характеристик бавовняних тканин полотняного переплетення після 5 та 20 циклів прання**

Зовнішній вигляд тканини	Колір	Поверхнева пористість, [%]		Зміна лінійних розмірів, основа/уток, [%]	
		5 циклів прання	20 циклів прання	5 циклів прання	20 циклів прання
	білий	27,3	32,9	9/4	9/4
	жовтий	27,3	32,8	9/4	9/4
	бежевий	27,3	32,8	8/3	8/3
	м'ятний	27,0	32,8	9/4	9/4
	рожевий	27,3	31,8	8/3	8/3
	блакитний	27,3	31,8	8/4	8/4
	червоний	27,2	32,4	9/3	9/3
	чорний	27,2	32,8	8/3	8/3

Здатність текстильних матеріалів екранувати УФ-випромінювання оцінювалася за значеннями коефіцієнта пропускання (%) в певному діапазоні довжин хвиль на UV-Vis спектрофотометрі DU-8800D (Drawell International Technology Ltd) (рис. 2). Прилад призначений для визначення екрануючих властивостей текстильних матеріалів від неіонізуючого електромагнітного випромінювання в діапазоні хвиль 190–1100 нм (ультрафіолетовий, видимий та інфрачервоний спектр).

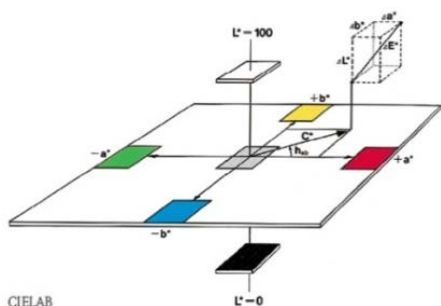


Рис. 1. Тривимірна система CIE Lab [12]

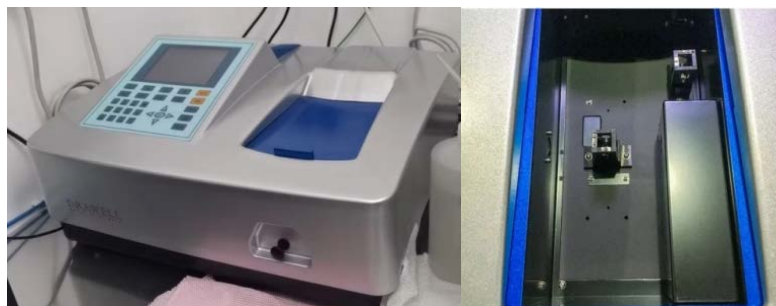


Рис. 2. UV-Vis спектрофотометр DU-8800D (Drawell International Technology Ltd)

Коефіцієнт захисту від ультрафіолету (UPF) визначався відповідно до стандарту EN 13758-1:2002 Textiles. Solar UV protective properties. Method of test for apparel fabrics. Відповідно до стандарту AS /NZ 4399:1996 Sun protective clothing – Evaluation and classification текстиль для захисту від УФ випромінювання класифікується відповідно до рейтингу UPF:









Рейтинг UPF	Категорія захисту від ультрафіолету
0, 5, 10	«не захищає»
15, 20	«хороший захист»
25, 30, 35	«дуже хороший захист»
40, 45, 50, 50+	«відмінний захист»

**Результати дослідження.**

**Оптичні властивості.** В системі CIELab колір визначається світлотою ( $L^*$ ), хроматичними компонентами: параметром  $a^*$ , який змінюється в діапазоні від зеленого до червоного, і параметром  $b^*$ , який змінюється в діапазоні від синього до жовтого, а також насиченістю ( $C^*$ ) та відтінком кольору ( $H^*$ ). Кольорові характеристики 8 гладкофарбованих бавовняних тканин полотняного переплетення до і після 20 циклів прання наведені в табл. 2.

Таблиця 2

**Зміна кольорових характеристик бавовняних тканин полотняного переплетення до та після 20 циклів прання (Система CIELab) [13]**

Колір тканини	Кількість циклів прання	Параметр					
		$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$H^*$	$\Delta E$
 білий	0	94,52	0,38	2,40	2,43	80,91	
	20	92,17	-2,47	1,47	2,87	149,24	
	$\Delta$	-2,35	-2,85	-0,93	0,44	2,97	3,81
 жовтий	0	76,92	11,91	62,66	63,78	79,24	
	20	74,81	8,54	64,75	65,31	82,49	
	$\Delta$	-2,12	-3,37	2,09	1,53	3,66	4,49
 бежевий	0	75,07	6,61	13,84	15,33	64,48	
	20	73,75	3,76	13,52	14,04	74,46	
	$\Delta$	-1,33	-2,84	-0,31	-1,30	2,55	3,15
 м'ятний	0	70,12	-7,20	-0,03	7,20	180,24	
	20	68,96	-8,52	-0,16	8,52	181,09	
	$\Delta$	-1,15	-1,31	-0,13	1,32	0,12	1,75
 рожевий	0	70,05	21,78	10,95	24,38	26,77	
	20	68,35	18,31	9,74	20,74	28,01	
	$\Delta$	-1,69	-3,47	-1,21	-3,64	0,52	4,05
 блакитний	0	65,71	-1,41	-17,20	17,26	265,33	
	20	63,39	-2,14	-17,87	17,99	263,16	
	$\Delta$	-2,31	-0,74	-0,67	0,74	-0,67	2,52
 червоний	0	42,88	52,03	26,15	59,13	26,25	
	20	38,50	50,04	27,01	56,86	28,36	
	$\Delta$	4,38	-2,99	0,85	-2,27	2,13	5,37
 чорний	0	20,70	0,27	-2,26	2,28	276,68	
	20	17,72	0,78	-2,24	2,37	289,22	
	$\Delta$	-2,99	0,51	0,03	0,09	0,51	3,03

Встановлено, що для 8 зразків тканин після 20 циклів прання хроматичні параметри  $a^*$  і  $b^*$  незначно змінюються від вихідного кольору (від зеленого до червоного або від синього до жовтого). Дослідження показали, що найбільш інформативний для встановлення ефекту «циклів прання» на оптичні властивості (колір) може бути використаний параметр  $L^*$  – світлота. Встановлено, що прання бавовняних тканин не призводить до статистично значимих зміни в кольорах полотен, хоча спостерігається тенденція до «потемніння» кольору кожного зразка, що продемонстровано на рис.3.

За даними [14] найбільш інформативним для оцінки зміни кольору в системі CIELab є параметр  $\Delta E$  – кольорова різниця, який є комплексним та враховує зміну світлоти та двох кольорових компонент зразка  $a^*$  і  $b^*$ . При цьому, загально прийнято рахувати, що:

- кольорова різниця «невидима» якщо  $\Delta E = 0,0 \div 1,0$ ;
- кольорова різниця «легко видима» якщо  $\Delta E = 1,0 \div 2,0$ ;
- кольорова різниця «видима» якщо  $\Delta E = 2,0 \div 4,0$ ;
- кольорова різниця «добре видима» якщо  $\Delta E = 4,0 \div 10,0$ ;
- кольорова різниця «велика» якщо  $\Delta E = > 10,0$ .

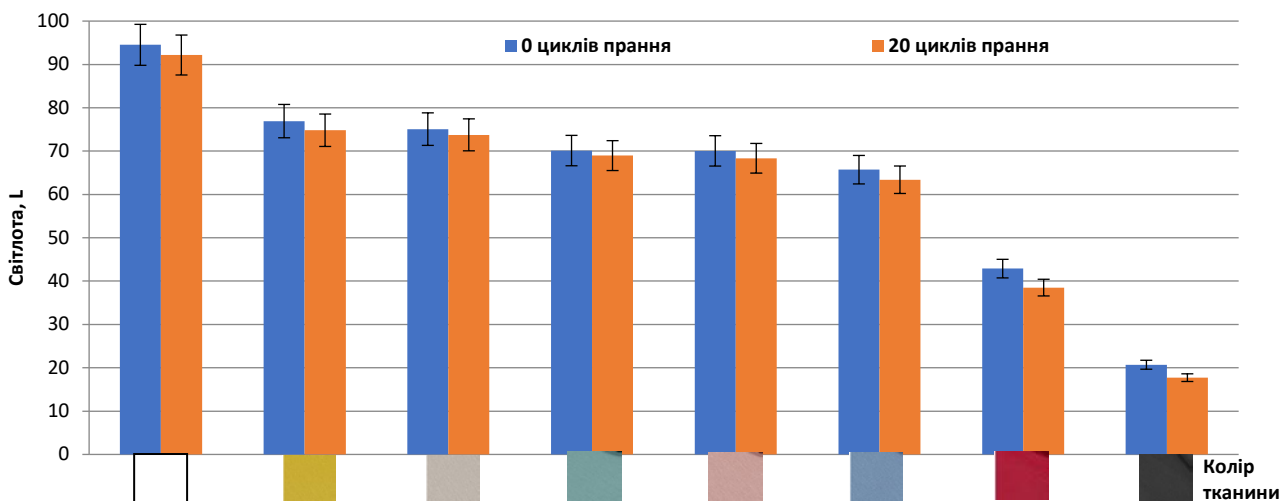


Рис. 3. Світлота зразків бавовняних тканин полотняного переплетення до та після 20 циклів прання

Як видно з даних табл. 2, кольори зразків бавовняних тканин після 20 циклів прання візуально відрізняються від кольорів вихідних полотен (0 циклів прання). Кольорова різниця  $\Delta E$  досліджених тканин знаходиться в межах від 1,75 до 5,37. Найбільш відчутні зміни в кольорі – «кольорова різниця добре видима» – спостерігаються в тканинах пофарбованих у рожевий, жовтий та червоний колір, відповідно.

**Екрануючі властивості.** Спектральні характеристики пропускання УФ випромінювання 8 гладкофарбованими бавовняними тканинами до прання наведені на рис. 4.

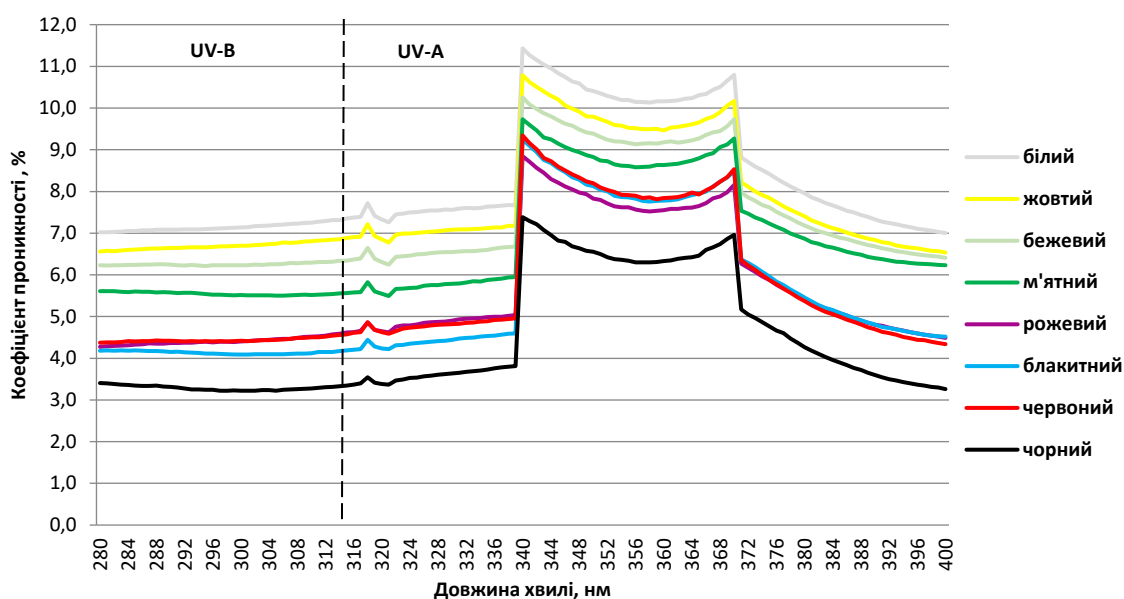










Рис. 4. Спектральні характеристики 8 гладкофарбованих бавовняних тканин полотняного переплетення до прання

За умови однаковості структурних характеристик 8 тканин, які відрізняються тільки кольором, спостерігається тенденція підвищення здатності текстильних матеріалів до екранування УФ випромінювання зі зменшенням значення параметру  $L^*$  – світлота. При цьому, тканини білого, жовтого, бежевого та м'ятного кольорів мають рівень UPF 0 – 10, що вказує на відсутність здатності цих тканин захищати тіло людини від негативної дії УФ випромінювання, і відносяться до категорії тканин, які «не захищають» (табл. 3). В свою чергу, тканини рожевого, блакитного, червоного та чорного кольорів відносяться за показником UPF до тканин з «хорошим захистом». Слід відмітити, що чорна тканина має найкращу здатність до екранування УФ випромінювання (табл. 3). Одержані дані підтверджують гіпотезу, яка є популярною серед дослідників, про те, що зменшення значення параметру  $L^*$  призводить до зниження значення коефіцієнту пропускання УФ випромінювання (коефіцієнт кореляції становить 0,9).

Таблиця 3

**Коефіцієнт захисту від ультрафіолету (UPF) 8 гладкофарбованих бавовняних тканин  
 полотняного переплетення до прання**

Зовнішній вигляд тканини	Колір	Коефіцієнт пропускання (T) в області УФВ, [%]	Коефіцієнт пропускання (T) в області УФА, [%]	Рівень UPF	Категорія захисту від ультрафіолету
	білий	7,15	8,67	0 – 10	«не захищає»
	жовтий	6,69	8,11	0 – 10	«не захищає»
	бежевий	6,25	7,74	0 – 10	«не захищає»
	м'ятний	5,55	7,23	0 – 10	«не захищає»
	рожевий	4,41	6,07	15 – 20	«хороший захист»
	блакитний	4,14	6,06	15 – 20	«хороший захист»
	червоний	4,44	6,15	15 – 20	«хороший захист»
	чорний	3,29	4,82	15 – 20	«хороший захист»

З попередніх досліджень відомо, що такий експлуатаційний фактор для тканин літнього асортименту як прання, є дуже впливовим на оптичні, гігієнічні, а, відповідно, і на екрануючі властивості полотен. Адже після нього тканина зазнає комплекс змін – механічних, хімічних, фізико-хімічних, фізико-механічних тощо В роботі було досліджено зміну екрануючих властивостей полотен протягом 1, 5 та 20 циклів прання. Результати визначення коефіцієнта проникності для 8 зразків тканин наведені на рис. 5 (а-з). Для всіх тканин спостерігається тенденція зменшення коефіцієнту проникності УФ випромінювання через структуру після 1 та 5 циклів прання. Найкраща здатність всіх тканин до екранування спостерігається після 5 циклів прання. Це пов'язано з усадкою полотен у напрямку основи та утоку (табл. 1), що призводить до зменшення поверхневої (наскрізної) пористості полотен (в проміжку від 27,0% до 27,3%) у порівнянні з пористістю зразків до прання (30,4%). Зменшення наскрізної пористості полотен призводить до зменшення проникності УФ випромінювання.

Після 20 циклів прання коефіцієнт проникності в усіх зразках збільшився. Це може бути пояснено зношуванням тканин, а саме частковим руйнуванням тканини та її структурних елементів внаслідок фізико-хімічних факторів, а саме: зменшення лінійної густини ниток основи та утоку, поверхневої густини тканини та відповідне збільшення поверхневої (наскрізної) пористості полотен: від 30,4% у вихідних полотен до 32,9% у полотен після 20 циклів прання. Слід відмітити, що після 20 циклів прання значення коефіцієнтів пропускання УФ випромінювання для всіх досліджуваних полотен відповідає рівню UPF 0 – 10, що вказує на втрату здатності цих тканин захищати тіло людини від негативної дії УФ випромінювання, і класифікувати їх, як такі, що «не захищають» від даного виду випромінювання.

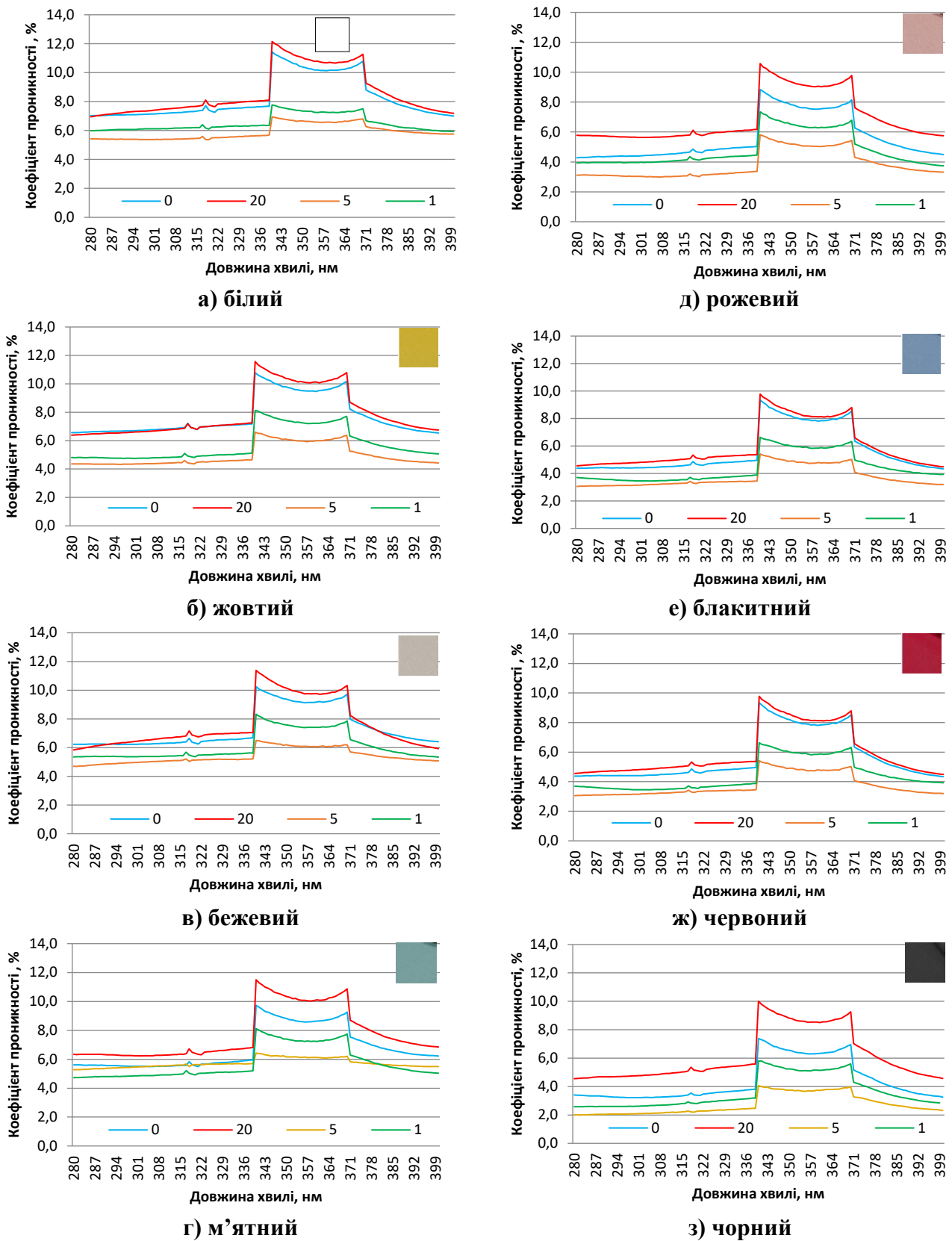


Рис. 5. Залежності коефіцієнта пропускання (Т, %) в різних областях УФ випромінювання для зразків бавовняних тканин після 0, 1, 5 та 20 циклів прання

**Висновки.** За результатами проведених досліджень встановлено, що хімічний склад полотен, їх структурні та оптичні властивості впливають на здатність текстильних матеріалів утворювати бар'єр для проникнення ультрафіолетового випромінювання. За умови однаковості структурних характеристик бавовняних тканин, які відрізняються тільки кольором, спостерігається тенденція підвищення здатності полотен до екранування УФ випромінювання зі зменшенням значення параметру  $L^*$  – світлота. При цьому, тканини білого, жовтого, бежевого та м'ятого кольорів мають рівень UPF 0 – 10, що вказує на відсутність здатності у цих тканин захищати тіло людини від негативної дії УФ випромінювання, і відносяться до категорії тканин, які «не захищають». Тканини рожевого, блакитного, червоного та чорного кольорів відносяться за показником UPF до тканин з «хорошим захистом». Одержані дані підтверджують гіпотезу про те, що зменшення значення параметру  $L^*$  призводить до зниження значення коефіцієнту пропускання УФ випромінювання (коефіцієнт кореляції становить 0,9).

Експлуатаційний фактор як прання, є дуже впливовим на оптичні, гігієнічні, а, відповідно, і на екрануючі властивості полотен. Адже після нього тканина зазнає комплекс змін – механічних, хімічних, фізико-хімічних, фізико-механічних тощо. Встановлено, що після 20 циклів прання значення коефіцієнтів пропускання УФ випромінювання для всіх досліджуваних полотен відповідає рівню UPF 0 – 10, що вказує на втрату здатності цих тканин захищати тіло людини від негативної дії УФ випромінювання, і класифікувати їх, як такі, що «не захищають». Це спричинено зношуванням тканин, а саме частковим руйнуванням тканини та її структурних елементів внаслідок фізико-хімічних факторів, а саме: зменшення лінійної густини ниток основи та утку, поверхневої густини тканини та відповідне збільшення поверхневої (наскрізної) пористості полотен.

## References

1. Official website of the World Health Organization. URL: [https://www.who.int/uv/uv\\_and\\_health/](https://www.who.int/uv/uv_and_health/)
2. Abidi, N., Hequet, E., Tarimala, S., Dai, L. L. (2007). Cotton fabric surface modification for improved UV radiation protection using sol-gel process. *Journal of Applied Polymer Science*, No. 104, P. 111–117.
3. Dubrovski, P. D., Golob, D. (2009). Effects of woven fabric construction and color on ultraviolet protection. *Textile Research Journal*, No. 79, P. 351–359.
4. Gies, P. H., Roy, C. R., Toomey, S., McLennan, A. (1998). Protection against solar ultraviolet radiation. *Mutation Research*, No. 422, P. 15–22.
5. Arabuli, S. I., Arabuli, A. T., Truba, V. S., Levytska, D. R. (2020). Doslidzhennia ekranuiuchykh vlastyvoitei tekstylnykh materialiv shchodo dii ultrafioletovoho vuprominiuvannia [Investigation of textile materials shielding properties to the effects of UV radiation]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Seriya Tekhnichni nauky = Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Series Technical Sciences*, No. 6 (152), P. 19–28 [in Ukrainian].
6. Arabuli, S. I., Vlasenko, V. I., Truba, A. A., Arabuli, A. T. (2022). Zakhyst vid shkidlyvoho ultrafioletovoho

## Література

1. Official website of the World Health Organization. URL: [https://www.who.int/uv/uv\\_and\\_health/](https://www.who.int/uv/uv_and_health/)
2. Abidi N., Hequet E., Tarimala S., Dai L. L. Cotton fabric surface modification for improved UV radiation protection using sol-gel process. *Journal of Applied Polymer Science*. 2007. No. 104. P. 111–117.
3. Dubrovski P. D., Golob D. Effects of woven fabric construction and color on ultraviolet protection. *Textile Research Journal*. 2009. No. 79. P. 351–359.
4. Gies P. H., Roy C. R., Toomey S., McLennan A. Protection against solar ultraviolet radiation. *Mutation Research*. 1998. No. 422. P. 15–22.
5. Арабулі С. І., Арабулі А. Т., Труба В. С., Левицька Д. Р. Дослідження екрануючих властивостей текстильних матеріалів щодо дії ультрафіолетового випромінювання. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2020. № 6 (152). С. 19–28.
6. Арабулі С. І., Власенко В. І., Труба А. А., Арабулі А. Т. Захист від шкідливого

- випромінювання: практичне застосування кубових барвників для функціоналізації бавовняних тканин [Protection against harmful UV radiation: practical application of vat dyes for functionalization of cotton fabrics]. *Industria mody = Fashion Industry*, No. 3–4, P. 53–61 [in Ukrainian].
7. Wilson, C. A., Bevin, N. K., Laing, R. M., Niven, B. E. (2008). Solar protection – Effect of selected fabric and use characteristics on UV transmission. *Textile Research Journal*, No. 78, P. 95–104.
8. Hatch, K. L., Osterwalder, U. (2006). Garments As Solar Ultraviolet Radiation Screening Materials. *Dermatologic Clinics*, Vol. 24, No. 1, P. 85–100.
9. Yallambie, V. (2003). Resource Guide for UV Protective Products – Information Section, Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency.
10. Willson, C. A., Gies, P. H., Niven, B. E., McLennan, A., Bevin, N. K. (2008). The Relationship between UV Transmittance and Colour Visual Description and Instrumental Measurement. *Textile Research Journal*, Vol. 78, No. 2, P. 128–137.
11. Dubrovski, D. P., Brezocnik, M. (2009). Prediction of the Ultraviolet Protection of Cotton Woven Fabrics Dyed with Reactive Dyestuffs. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, Vol. 17, No. 1, P. 55–59.
12. Gilchrist, A., Nobbs, J. (2017). *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, Publishing, Elsevier, University of Leeds.
13. Truba, A. A., Arabuli, S. I. (2023). Vplyv bahatorazovoho prannia na optychni vlastyvoli bavovnianykh tkanyn [The influence of repeated washing on the optical properties of cotton fabrics]. *Zbirnyk materialiv VII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii tekstylnykh ta feshn tekhnolohii KyivTex&Fashion = Collection of materials of the VII International Scientific and Practical Conference of Textile and Fashion Technologies KyivTex&Fashion*, October 19, 2023, Kyiv]. Kyiv: KNUTD. P. 226–228 [in Ukrainian].
14. Matusiak, M., Walawska, A., Sybilska, W. (2017). Comparison of Spectrophotometric and Digieye Colour Measurements of Woven Fabrics. *Journal of Textile & Apparel/Tekstil ve Konfeksiyon*, No. 27, P. 53–59.
- ультрафіолетового випромінювання: практичне застосування кубових барвників для функціоналізації бавовняних тканин. *Індустрія моди*. 2022. № 3–4. С. 53–61.
7. Wilson C. A., Bevin N. K., Laing R. M., Niven B. E. Solar protection – Effect of selected fabric and use characteristics on UV transmission. *Textile Research Journal*. 2008. No. 78. P. 95–104.
8. Hatch K. L., Osterwalder U. Garments As Solar Ultraviolet Radiation Screening Materials. *Dermatologic Clinics*. 2006. Vol. 24, No. 1. P. 85–100.
9. Yallambie V. Resource Guide for UV Protective Products – Information Section, Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, 2003.
10. Willson C. A., Gies P. H., Niven B. E., McLennan A., Bevin N. K. The Relationship between UV Transmittance and Colour Visual Description and Instrumental Measurement, *Textile Research Journal*. 2008. Vol. 78, No. 2. P. 128–137.
11. Dubrovski D. P., Brezocnik M. Prediction of the Ultraviolet Protection of Cotton Woven Fabrics Dyed with Reactive Dyestuffs. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2009. Vol. 17, No. 1. P. 55–59.
12. Gilchrist A., Nobbs J. *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, Publishing, Elsevier, University of Leeds, 2017.
13. Труба А. А., Арабулі С. І. Вплив багаторазового прання на оптичні властивості бавовняних тканин. *Збірник матеріалів VII Міжнародної науково-практичної конференції текстильних та фешн технологій KyivTex&Fashion*, 19 жовтня 2023 р., м. Київ. Київ: КНУТД, 2023. С. 226–228.
14. Matusiak M., Walawska A., Sybilska W. Comparison of Spectrophotometric and Digieye Colour Measurements of Woven Fabrics. *Journal of Textile & Apparel/Tekstil ve Konfeksiyon*. 2017. No. 27. P. 53–59.

**TRUBA ANASTASIIA**

PhD Student, Department of Fashion Technology,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
E-mail: [truba.aa@knutd.edu.ua](mailto:truba.aa@knutd.edu.ua)

**ARABULI SVITLANA**

PhD, Associate Professor, International Institute of  
Postgraduate and Doctoral Studies, Kyiv National  
University of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-1049-8255>  
Scopus Author ID: 54405479200  
E-mail: [arabuli.si@knutd.edu.ua](mailto:arabuli.si@knutd.edu.ua)

**KOVTONYUK LIUDMYLA**

Higher category teacher,  
Zhytomyr Technological Professional College  
of KNUCA, Ukraine  
E-mail: [kovtonukluda69@gmail.com](mailto:kovtonukluda69@gmail.com)

**SVYDLO OLEKSANDR**

PhD Student, Department of Fashion and Style,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
E-mail: [svydlo.os@knutd.edu.ua](mailto:svydlo.os@knutd.edu.ua)

**ARABULI ARSENI**

PhD, Associate Professor, Department of Fashion  
and Style, Kyiv National University  
of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-2583-4998>  
Scopus Author ID: 23093245500  
E-mail: [arabuli.a@knutd.edu.ua](mailto:arabuli.a@knutd.edu.ua)

**<sup>1</sup>TRUBA A. A., <sup>1</sup>SVYDLO O. S., <sup>1</sup>ARABULI S. I., <sup>1</sup>ARABULI A. T., <sup>2</sup>KOVTONYUK L. M.**

<sup>1</sup>Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<sup>2</sup>Zhytomyr Technological Professional College of KNUCA, Ukraine

**EFFECT OF MULTIPLE WASHING ON THE OPTICAL AND SHIELDING  
PROPERTIES OF COTTON FABRICS**

**Purpose.** Cotton fabrics are most often used for the production of summer clothing. Such fabrics should provide aesthetic performance, high wearing comfort and protection from the negative effects of ultraviolet (UV) radiation. At the same time, products made from these fabrics are subject to frequent washing, which can negatively affect the appearance of the clothing and the shielding properties of the fabrics.

**Methodology.** Theoretical and experimental studies are based on the basic principles of textile materials science. The optical properties of fabrics were evaluated in the Commission Internationale de l'Éclairage  $L^*a^*b^*$  (CIELab) color space using a 3NH NR-20XE colorimeter at D-65/10 radiation. The ability of fabrics to shield UV radiation was evaluated by the values of the transmittance (%) on a DU-8800D UV-Vis spectrophotometer (Drawell International Technology Ltd) in accordance with the EN 13758-1:2002 standard with the determination of the ultraviolet protection factor (UPF).

**Results.** Modern measures for protecting humans from UV radiation were analyzed. It has been established that clothing is considered one of the most effective means of protecting human skin from UV, while the shielding properties of textiles are decisive. The influence of the main indicators of textiles (chemical composition of fibers, porosity and color) on the level of protection of 8 investigated fabrics against UV radiation was studied. The effect of repeated washing on the optical and shielding properties of cotton fabrics was studied.

**Scientific novelty.** It has been experimentally proven that multiple washing of cotton fabrics leads to visible changes in the optical and structural properties of the fabrics. It has been established that the most informative parameter for establishing the effect of "washing cycles" on optical (color) and screening properties is the parameter  $L^*$  – lightness. The obtained data confirm the hypothesis that a decrease in the value of the parameter  $L^*$  leads to a decrease in the value of the UV radiation transmittance (the correlation coefficient is 0.9).

**Practical value.** The influence of structural and optical properties of textile materials on their ability to shield UV radiation is summarized. Dependencies between the optical and shielding properties of cotton fabrics based on the results of multiple washings are established.

**Keywords:** cotton; textiles; protection; electromagnetic radiation; UV radiation; optical properties; color; multiple washing.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.5.9>

УДК 547.22:  
541.13:541.8:  
541.127

<sup>1</sup>ЄФІМОВА І. В., <sup>1</sup>СМИРНОВА О. В., <sup>2</sup>БЕССАРАБОВ В. І.

<sup>1</sup>Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup>Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

## ВИВЧЕННЯ ДІЇ БІНАРНИХ АНТИОКСИДАНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ З АСКОРБІНОВОЮ КИСЛОТОЮ НА МОДЕЛЬНИХ СИСТЕМАХ

**Вступ.** Проблематика створення антиоксидантних композицій з покращеними та більш ефективними властивостями набуває актуальності останні роки в зв'язку з ростом розповсюдження грипу, пневмонії та інших респіраторних захворювань, в основі механізму перебігу яких лежать вільнорадикальні процеси. Сумісне використання антиоксидантів сприяє більш ефективному пригніченню вільнорадикальної оксидатії ліпідів мембран (аскорбінова кислота з вітаміном Е, А, флаваноїдами, каротиноїдами, глутатіоном). Розуміння точних характеристик та властивостей природних біопротекторів поглиблює уявлення про базові механізми взаємодії між антиоксидантами. Використання модельних систем дає можливість досліджувати складні та багатогранні оксидатійні процеси, в яких *in vivo* приймає участь аскорбінова кислота. В якості модельних систем зручно використовувати радикально-ланцюгове окиснення органічних субстратів в апротонному середовищі – процес, в якому майже досконало вивчені всі елементарні стадії та отримані їх кінетичні параметри.

**Мета.** Встановлення фізико-хімічних закономірностей оксидатійних процесів у присутності антиоксидантних композицій аскорбінової кислоти з аніон-радикалом кисню, гуміновою та гіматомелановою кислотами, а також виявлення особливостей регулювання антиоксидантних та прооксидантних властивостей цих супрамолекулярних інгібуючих систем у радикально-ланцюгових процесах.

**Методика.** Методом вимірювання зміни поглиненого молекулярного кисню було досліджено ініційоване окиснення кумолу в апротонному середовищі в присутності антиоксидантних композицій аскорбінової кислоти з аніон-радикалом кисню, гуміновою та гіматомелановою кислотами.

**Результати.** В роботі, що представлена, на базі ініційованого радикально-ланцюгового процесу окиснення кумолу в апротонному середовищі (модельна система) досліджено антиоксидантну дію бінарних композицій аскорбінової кислоти з деякими представниками інгібіторів природного походження. Вивчено особливості перебігу окиснення модельної системи в присутності гумінових та гіматомеланових кислот, доведена їх антиоксидантна властивість. Спостерігалось посилення гальмівної дії гумінових речовин на процес оксидатії кумолу зі збільшенням їх концентрації в модельній системі. Також доведено, що зі збільшенням концентрації цих бінарних поєднань у досліджуваній системі протекторна ефективність посилюється. Досліджено вплив супрамолекулярної композиції аскорбінової кислоти та аніон-радикалу кисню на процес оксидатії модельної системи. Показано, що сумісна дія аскорбінової кислоти та супероксид аніону носить гальмівний характер, та цей ефект посилюється зі збільшенням концентрації антиоксидантного комплексу у досліджуваній системі.

**Наукова новизна.** Виявлено, що при окисненні модельної системи комплексна інгібівна дія антиоксидантної композиції аскорбінової кислоти та гумінових речовин з бурого вугілля має адитивний ефект. Індукційна дія, що викликана присутністю антиоксидантної композиції аскорбінової кислоти з супероксид аніоном, носить синергетичний характер, для якого знайдено оптимальне співвідношення кількості аніон-радикалу кисню та аскорбінової кислоти в антиоксидантній композиції для максимального синергетичного ефекту.

**Практична значимість.** Експериментально підтверджено медіаторну участь аніон-радикалу кисню в процесах окиснення модельної системи в присутності аскорбінової кислоти, що може зробити внесок у розуміння механізмів протікання багатьох патологічних станів, викликаних вільнорадикальними оксидатійними процесами. Доведено доречність використання приведеної модельної системи для подальшого вивчення антиоксидантної дії гумінових речовин та антиоксидантних композицій на їх основі.

**Ключові слова:** аскорбінова кислота; антиоксиданти; інгібування; синергізм; адитивність.

**Вступ.** Вільнорадикальні процеси окиснення, що відбуваються по ланцюговому механізму, є одним із способів існування біосистем та методом підтримування їх життєдіяльності. Перебіг окисдації в біологічних об'єктах визначається вільнорадикальним шляхом, регулювання якого здійснюється за допомогою одного або декількох інгібіторів.

Автори Levy et al. (2020) [12] вважають, що вільно-радикальні процеси відіграють важливу роль при зараженні COVID-19. Відтак в останній час зросла увага до антиоксидантів при лікуванні COVID-19 завдяки їх ймовірній здатності зупиняти запалення, з метою подолання синдрому вивільнення цитокінів активними формами кисню. Існує гіпотеза, що ефективність боротьби з новим коронавірусом підвищиться з використанням ліків з антиоксидантною активністю. Антиоксиданти природного походження, такі як аскорбінова кислота, астаксантин, поліфеноли, мелатонін, кверцетин, глутатіон мають широкий спектр застосування в експериментальних та клінічних дослідженнях онкології, пневмонії, грипу, та інших респіраторних захворювань (Du et al., 2012; Fiedor and Burda, 2014; Halliwell and Gutteridge, 2015) [2, 5, 7]. У дерматології вітамін С відомий через свою участь у синтезі колагену, а також через його антиоксидантну функцію, яка, зрештою, сприяє зменшенню старіння шкіри (Yilmaz and Toledo, 2004) [21].

Проте, щоб бути ефективними, антиоксиданти повинні залишатися у своїй неокисленій формі. Однак вітамін С є помірно сильним відновником, що робить його нестабільним у водних системах при високих значеннях рН. Він особливо схильний до окисної деградації, і у водних розчинах аскорбінова кислота легко розкладається з утворенням окислених форм, які не мають антиоксидантних властивостей. У результаті збереження стабільності антиоксиданту часто виявлялося складним завданням.

Автори (Fotia and Amorati, 2009) [6] наголошують, що у різних модельних системах (маргарини, лярди, рослинні олії) показано можливість уповільнення аскорбіновою кислотою (АК) радикально-ланцюгових процесів окиснення, виходячи з чого АК відносять до групи антиоксидантів. Водночас, за АК встоялося також визначення «прооксидант», що виникло з урахуванням її здатності прискорювати деякі вільнорадикальні реакції. А саме механізмом прооксидантної дії АК пояснюють відновленням іонів металів, утворенням перекису водню і вільного гідроксильного радикалу при окисненні самої АК. Вільні радикали утворюються також при реакції дегідроаскорбінової кислоти (ДАК) з ароматичними амінами і переносі електрона з моноаніону АК на феноксильні та інші радикали (Deronte, 2013) [3].

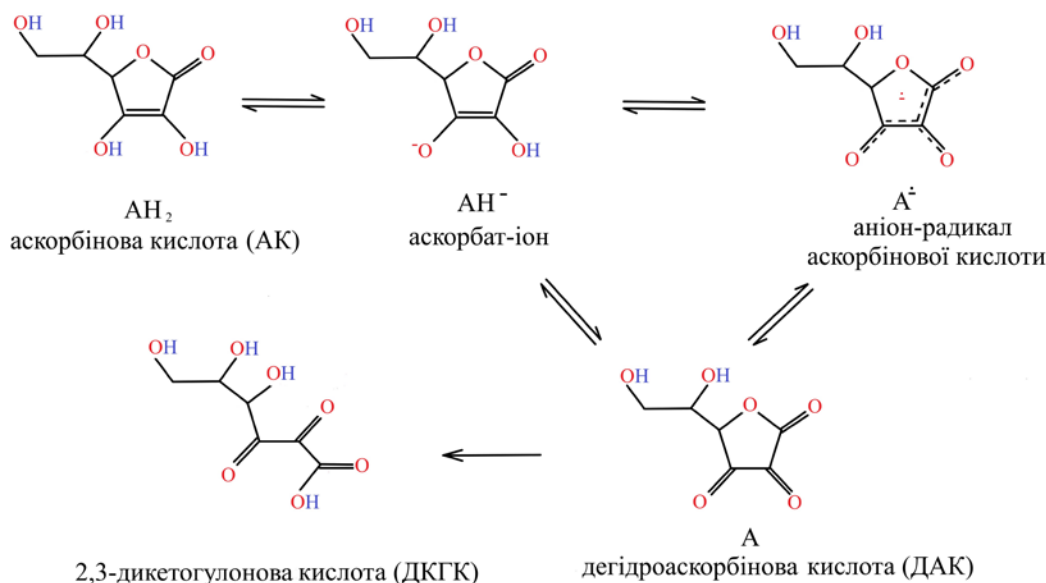
Проблема створення антиоксидантних композицій з покращеними та більш ефективними властивостями набуває актуальності останні роки в зв'язку з розповсюдженням грипу, пневмонії та інших респіраторних захворювань, в основі механізму перебігу яких лежать вільнорадикальні процеси. Сумісне використання антиоксидантів сприяє більш ефективному пригніченню перекисної окисдації ліпідів мембран (аскорбінова кислота з вітаміном Е, А, флаваноїдами, каротиноїдами, глутатіоном). Знання точних характеристик та властивостей природних біологічно активних сполук поглиблює наше розуміння щодо базових механізмів взаємодії між антиоксидантами.

Унікальна властивість аскорбінової кислоти зазнавати зворотню окисдацію значно ускладнює вивчення *in vivo* окислювальних процесів за її участю, проте розгляд цих питань є необхідним та водночас можливим завдяки використанню модельних систем. А саме, на прикладі вивчення закономірностей вільнорадикального окиснення органічних субстратів молекулярним киснем в апротонному середовищі (модельна система) у присутності аскорбінової кислоти, а також бінарних композицій аскорбінової кислоти з деякими представниками інгібіторів природного походження.

**Огляд літератури.** Аскорбінова кислота (АК), також відома як вітамін С, є одним з першочергових захисників організму від дії вільних радикалів та інших патогенних чинників. Здатність АК пригнічувати перекисне окиснення ліпідів, дає можливість нейтралізувати

окиснювачі, що надходять із забрудненим повітрям, редукувати канцерогенні нітроаміни (Suresh et al., 2000) [18]. Вона також бере участь у виробленні енергії, необхідної для синтезу інтерферону та інших цитокінів, запобігає пероксидації холестеролу і тим самим перешкоджає прогресу атеросклерозу (Kamei et al., 2016) [9].

Автори Wagner and Rimbach (2009) [19] повідомляють, що антиоксидантні властивості АК засновані на її здатності зворотно окислюватись у дегідроаскорбінову кислоту (ДАК). І таким чином, АК, утворені нею проміжні радикальні частинки та ДАК являють собою ефективну редокс-систему (рис. 1), що володіє високою вітамінною активністю.



Джерело: розроблено авторами на основі досліджень Wagner and Rimbach (2009) [19].

Рис. 1. Окислювально-відновна система аскорбінової кислоти

Перехід АК в ДАК двоетапний: на першому етапі з молекули АК ( $\text{AH}_2$ ) утворюється аскорбат-іон  $\text{AH}^-$ , на другому аскорбат-іон трансформується в аніон-радикал  $\text{A}^{\bullet-}$ . Далі вони диспропорціонують з утворенням АК та ДАК. Надалі ДАК гідролізується з утворенням 2,3-дикетогулонової кислоти (ДКГК), яка може зазнавати подальших змін. Система АК біологічних об'єктів має вітамінні властивості, але ДКГК, що утворюється з ДАК, вже позбавлена біологічної активності.

Незвичайні біологічні властивості АК, спрямовані на захист від вільно-радикальної деструкції, швидше за все пов'язані з її ефективністю як пастка радикалів і, що важливо, стабільністю її аніон-радикалу.

Авторами Sawyer et al. (1985) [15] опубліковано, що при окисленні АК киснем в апотонному та водному середовищах, реалізованому за ланцюговим механізмом, як проміжний продукт утворюється супероксид-аніон, який взаємодіє з АК та аскорбат-радикалом. Деталі механізму взаємодії АК з АРК в апротонному середовищі представлені схемою:





Джерело: розроблено авторами на основі досліджень Sawyer et al. (1985) [15].

Утворення аніон-радикалу кисню відбувається при окисненні аскорбат-іону молекулярним киснем (реакція 1). Константа швидкості реакції невелика, для апротонного середовища становить  $k=0,68\pm 0,21$  л/(моль·с) та для водного –  $k=0,32\pm 0,08$  л/(моль·с). Висока швидкість реакції (2) взаємодії АК з аніон-радикалом кисню ( $k=2,7\cdot 10^5$  л/(моль·с)) та реакції (3) взаємодії аскорбат-радикалу з супероксид-аніоном ( $k\sim 5\cdot 10^4$  л/(моль·с)) обумовлює здатність АК пригнічувати дію аніон-радикалу кисню.

У біологічних об'єктах АК володіє сильно вираженими властивостями, що відновлюють, є ефективною «пасткою» активних форм кисню. І факт утворення аніон-радикалу кисню як проміжного продукту при окисненні АК може бути цікавим у зв'язку з вивченням реакцій супероксид-аніону з активними біологічно субстратами. Дослідження у цьому напрямі мають особливе значення, оскільки, таким чином, може бути встановлений механізм токсичної дії аніон-радикалу кисню в живих організмах та можливі шляхи нейтралізації негативних наслідків, спричинених його присутністю.

В останні часи одним з перспективних напрямків «зеленої» хімії є використання антиоксидантних композицій з рослинної сировини, що визнана як доступне та дешеве природне джерело біологічно активних речовин. Це зумовлено тим, що природні препарати, на відміну від синтетичних, менш токсичні, більш доступні та екологічно безпечні, легко засвоюються організмом людини і надають комплексну лікувальну дію (Ingold and Pratt, 2014) [8].

В літературі (Wawrzyniak et al., 2013) [20] описано синергетичну дію АК та деяких поліфенолів та  $\alpha$ -токоферолів. Авторами Zhou and Zheng (1991) [22], а також Kostyuk and Rotarovich (1989) [11] виявлено антагонізм антирадикальної дії композицій дигідрокверцетин – АК, кверцетин – АК. Також описано синергетичну дію АК та убихінона, що спостерігається при інгібуванні окиснення ліноленової кислоти.

**Матеріали та методи.** В рамках поставленої задачі методом вимірювання зміни поглиненого молекулярного кисню було досліджено окисдацію модельної системи, яка являє собою процес ініційованого азодизобутиронітрилом (АІБН) окиснення модельного субстрату кумолу (ПБ) з додаванням диметилсульфоксиду (ДМСО), який створює середовище, що не містить вільного протону. За перебігом процесу окиснення спостерігали за зміною кількості поглиненого молекулярного кисню з часом при сталому парціальному тиску і температурі на обладнанні, що приведено в літературі (Emanuel et al., 1973) [4]. В роботі використовувалися АІБН, ПБ, ДМСО, очищені за методиками, описаними авторами Armarego and Chai (2003) [1]. Досліджували окиснення модельної системи в присутності антиоксидантних композицій аскорбінової кислоти з аніон-радикалом кисню, гуміновою та гематомелановою кислотами.

**Результати дослідження.** В даному дослідженні вивчали сумісну дію АК з декількома біологічно активними сполуками в процесах радикально-ланцюгового окиснення кумолу. В якості таких сполук було обрано гумінову (ГК) та гематомеланову (ГМК) кислоти, як представники класу природних поліфенолів, а також аніон-радикал кисню (АРК) – сполука, що утворюється в багатьох біохімічних процесах.

Гальмування процесів окиснення антиоксидантними композиціями можна розділити на декілька типів: антагонізм (коли інгібітори нейтралізують дію друг друга), адитивність інгібування (гальмуюча дія суміші дорівнює сумі антиоксидантних впливів кожного з

компонентів) і синергізм (перевищення суми індукційних ефектів кожного антиоксиданту). Найбільший інтерес з практичної точки зору викликає явище синергізму в процесах інгібування окисації. Ефект синергізму спостерігають у випадках, коли до складу антиоксидантної композиції входять представники різних класів інгібіторів, до структури молекул яких входять різні функціональні групи. Завдяки чому ці речовини мають відмінності у антирадикальних та антиоксидантних властивостях, а саме переривають окисацію за різними механізмами. Відомі випадки, коли деякі речовини (синергісти) не мають антиоксидантних властивостей, але посилюють дію окремих інгібіторів в процесах окиснення. Захисний комплекс біологічних об'єктів представлено різноманітними композиціями антиоксидантів та синергістів.

На рис. 2 представлено кінетичні криві окиснення ПБ в присутності АК та АРК. Спостерігається виражений період індукції, що зумовлений інгібівною дією цих антиоксидантів. У випадку використання двох інгібіторів АК та АРК (крива 4), величина періоду індукції перевищує це значення для систем, в яких данні антиоксиданти діяли індивідуально (криві 2 і 3). Синергетичний ефект дії зберігається при варіюванні концентрацій АК та АРК в досліджуваній системі.

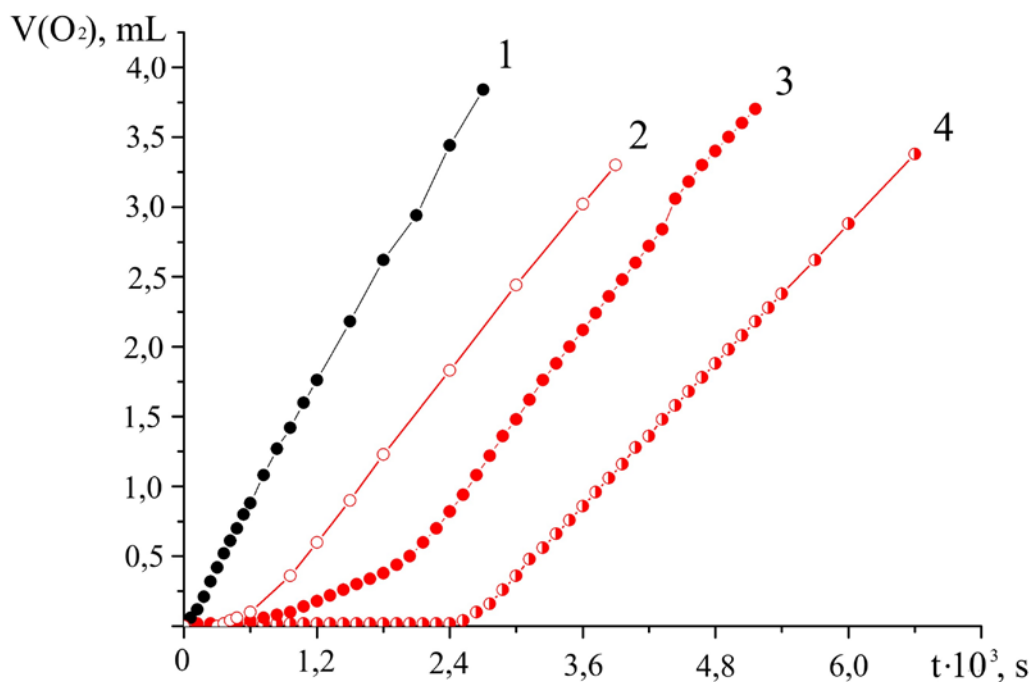


Рис. 2. Зміна кількості поглиненого кисню ( $V(O_2)$ , мл) з часом ( $t$ , с) в процесі окиснення модельної системи (1) внаслідок присутності АРК (2), АК (3) та їх сумісної дії (4)

Гумінові речовини отримують з торфу, ґрунтового гумусу, бурого вугілля, сапропелів та сланців. Саме вони завдяки своїй хімічній активності є найбільш пріоритетні з точки зору цінової політики створення бази сировини для впровадження нанотехнологій (Souza and Braganca, 2018; Klucakova, 2018) [10, 17]. Такі функціональні групи, як гідроксильні, карбоксильні, хіноїдні, аміногрупи, роблять їх універсальними об'єктами для вирішення хіміко технологічних завдань різноманітного плану (Nenadis et al., 2007; Mignone et al., 2012) [13, 14]. В останні роки особливий інтерес викликають інгібітори комбінованої дії, відомі як поліфункціональні стабілізатори. Наявність у структурі молекул таких інгібіторів гідроксильної (-OH), сульфідної (-SH), аміної (-NH<sub>2</sub>) та хіноїдних груп передбачає пролонгування антиоксидантної дії за рахунок можливості комбінованого впливу функціональних груп на процес інгібування окиснення, обумовлює їх біологічну активність і

передбачає здатність до прооксидантної або антиоксидантної дії. Проте в літературі немає детальних досліджень властивостей цих гумінових речовин.

В даній роботі вивчено процес радикально-ланцюгової оксидації ПБ в апротонних розчинниках у присутності ГК та суміші ГК та АК. На рис. 3. представлені характерні кінетичні криві, що описують ці процеси. Виявлено, що ГК гальмує окиснення вуглеводня напротязі перебігу всього процесу (крива 2). Крім того, уповільнення збільшується пропорційно до зростання концентрації ГК в модельній системі. При додаванні АК та ГК до окислювальної суміші спостерігали індукційний ефект, що був обумовлений присутністю АК, та зменшення швидкості поглинання кисню після виходу з періоду індукції, що є наслідком присутності ГК (крива 4). Аналогічну антиоксидантну дію та адитивність при інгібуванні з АК проявляє ГМК.

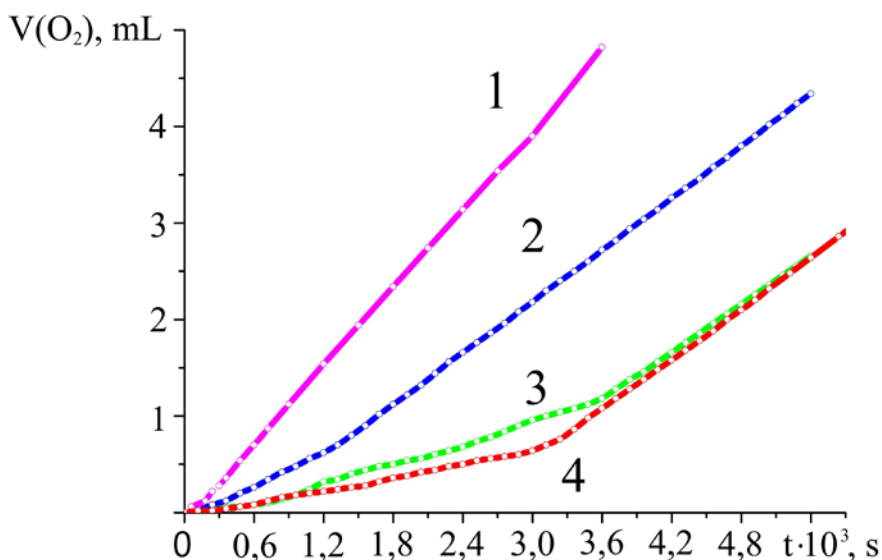


Рис. 3. Зміна кількості поглиненого кисню ( $V(O_2)$ , мл) з часом ( $t$ , с) в процесі окиснення модельної системи (1) внаслідок присутності ГК (2), АК (4) та їх сумісної дії (3)

Спільне введення інгібітору, що обриває ланцюгову реакцію, та речовини, що руйнує гідропероксиди, широко використовують для більш ефективного гальмування окисних процесів у поліолефінах, каучуках, мастилах та інших матеріалах. Як акцептор пероксидного радикалу застосовують різноманітні феноли, бісфеноли, ароматичні аміни, а для руйнування гідропероксидів вводять арилфосфіти, етери тіопропіонової кислоти, діалкілдітіопропіонати, тіофосфати цинку та нікелю та інші аналогічні сполуки (Fotia and Amorati, 2009) [6].

В таблиці 1 показано значення величини швидкості поглинання кисню ( $W$ ) при окисненні модельних систем у присутності різних інгібіторів та їх комбінацій. В присутності аскорбінової кислоти зафіксували гальмівний ефект, величина якого зростає ростом концентрації АК в модельній системі, а також невелике зменшення швидкості оксидації після виходу з періоду індукції. В присутності ГК спостерігали зменшення швидкості окиснення на протязі всього перебігу процесу, яке прямопропорційно залежить від росту концентрації ГК в реакційній суміші. В присутності гумінової та аскорбінової кислот в досліджуваній системі спостерігали адитивність інгібуючої дії цих двох антиоксидантів. Аналогічні ефекти відбуваються при заміні ГК на ГМК.

У випадку використання АРК в якості інгібітору спостерігали наявність індукційного ефекту, величина періоду індукції збільшується з ростом концентрації супероксиду в системі, та фіксується, як і у випадку з АК, невеличке зменшення швидкості поглинання кисню після виходу з нього. При одночасному введенні АК та АРК в реакційну суміш виявлена синергізм

дії цих двох антиоксидантів в процесі інгібування окиснення. Синергетична ефективність інгібування АК та АРК складає 1,19.

Таблиця 1

**Значення величини швидкості поглинання кисню (W) та періоду індукції ( $\tau$ )  
модельними системами в залежності від антиоксидантної композиції**

Антиоксидантна композиція	$\tau \cdot 10^3$ , с	$W \cdot 10^6$ , моль/(л·с)
-	0	2,79
АК	1,68	2,53
ГК	0	1,72
ГмК	0	1,84
АРК	0,60	2,75
АК+ГК	1,62	1,77
АК+ГмК	1,68	1,88
АК+АРК	2,94	2,77

**Висновки:**

1. На базі ініційованого радикально-ланцюгового процесу окиснення кумолу в апротонному середовищі (модельна система) досліджено антиоксидантну дію бінарних композицій аскорбінової кислоти з деякими представниками інгібіторів природного походження. Вивчено особливості перебігу окиснення модельної системи в присутності гумінових та гіматомеланових кислот, доведена їх антиоксидантна властивість. Спостерігалось посилення гальмівної дії гумінових речовин на процес окисдації кумолу зі збільшенням їх концентрації в модельній системі. Доведено доречність використання приведеної модельної системи для подальшого вивчення антиоксидантної дії гумінових речовин та антиоксидантних композицій на їх основі. Виявлено, що комплексна інгібівна дія антиоксидантної композиції аскорбінової кислоти та гумінових речовин з бурого вугілля має адитивний ефект. Також доведено, що зі збільшенням концентрації цього бінарного поєднання у досліджуваній системі протекторна ефективність посилюється.

2. Досліджено протекторний вплив супрамолекулярної композиції аскорбінової кислоти та аніон-радикалу кисню на процес окисдації модельної системи. Показано, що сумісна дія аскорбінової кислоти та супроксид аніону носить гальмівний характер, та цей ефект посилюється зі збільшенням концентрації антиоксидантного комплексу у досліджуваній системі. Визначена індукційна дія носить синергетичний характер, для якої знайдено оптимальне співвідношення кількості аскорбінової кислоти та аніон-радикалу кисню в антиоксидантній композиції для максимального синергетичного ефекту. Експериментально підтверджено участь аніон-радикалу кисню як медіатора в процесах окиснення модельної системи в присутності аскорбінової кислоти, що може зробити внесок у розуміння механізмів протікання багатьох патологічних станів, викликаних вільнорадикальними окисдаційними процесами.

**References**

1. Armarego, W. L. F., Chai, Ch. L. L. (2003). Purification of Laboratory Chemicals. Elsevier Science B. V., 608 p.
2. Du, J., Cullen, J. J., Buettner, G. R. (2012). Ascorbic acid: Chemistry, biology and the treatment of cancer. *Biochim. Biophys. Acta*, 1826(2): 443–457. DOI: 10.1016/j.bbcan.2012.06.003.

**Література**

1. Armarego W. L. F., Chai Ch. L. L. Purification of Laboratory Chemicals. Elsevier Science B. V., 2003. 608 p.
2. Du J., Cullen J. J., Buettner G. R. Ascorbic acid: Chemistry, biology and the treatment of cancer. *Biochim. Biophys. Acta*. 2012. Vol. 1826(2). P. 443–457. DOI: 10.1016/j.bbcan.2012.06.003.

3. Deponte, M. (2013). Glutathione catalysis and the reaction mechanisms of glutathione-dependent enzymes. *Biochim. Biophys. Acta*, 1830(5): 3217–3266. DOI: 10.1016/j.bbagen.2012.09.018.
4. Emanuel, N. M., Zaikov, G. Ye., Mayzus, Z. K. (1973). Rol' sredi v radikal'no-tsepnykh reaktsiyakh okisleniya organicheskikh soyedineniy. M.: Nauka. 297 p.
5. Fiedor, J., Burda, K. (2014). Potential role of carotenoids as antioxidants in human health and disease. *Nutrients*, 6(2): 466–488. DOI: 10.3390/nu6020466.
6. Fotia, M. C., Amorati, R. (2009). Non-phenolic radical-trapping antioxidants. *J. Pharm. Pharmacol.*, 61(11): 1435–1448. DOI:10.1211/jpp/61.11.0002.
7. Halliwell, B., Gutteridge, J. M. (2015). Free radicals in biology and medicine. 5th edn. Oxford University Press, Oxford. 944 p.
8. Ingold, K. U., Pratt, D. A. (2014). Advances in radical-trapping antioxidant chemistry in the 21st century: a kinetics and mechanisms perspective. *Chemical reviews*, 114(18): 9022–9046. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr500226n>.
9. Kamei, M., Nishimura, H., Takahashi, T., Takahashi, N., Inokuchi, K., Mato, T., Takahashi, K. (2016). Anti-influenza virus effects of cocoa. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(4): 1150–1158. DOI: 10.1002/jsfa.7197.
10. Klucakova, M. (2018). Conductometric study of the dissociation behavior of humic and fulvic acids. *Reactive and Functional Polymers*, 128: 24–28. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2018.04.017.
11. Kostyuk, V. A., Potapovitch, A. I. (1989). Superoxide-driven Oxidation of Quercetin and a Simple Sensitive Assay for Determination of Superoxide Dismutase. *Biochem. Int.*, 19(5): 1117–1124.
12. Levy, E., Delvin, E., Marcil, V., Spahis, S. (2020). Can phytotherapy with polyphenols serve as a powerful approach for the prevention and therapy tool of novel coronavirus disease 2019 (COVID-19)? *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism*, 319(4): 689–708. DOI: 10.1152/ajpendo.00298.2020.
13. Mignone, R. A., Martin, M. V., Vieyra, F. E. M., Palazzi, V. I., de Mishima, B. L., Martire, D. O., Borsarelli, C. D. (2012). Modulation of Optical Properties of Dissolved Humic Substances by their Molecular Complexity. *Photochem.*
3. Deponte M. Glutathione catalysis and the reaction mechanisms of glutathione-dependent enzymes. *Biochim. Biophys. Acta*. 2013. Vol. 1830(5). P. 3217–3266. DOI: 10.1016/j.bbagen.2012.09.018.
4. Emanuel N. M., Zaikov G. Ye., Mayzus Z. K. Rol' sredi v radikal'no-tsepnykh reaktsiyakh okisleniya organicheskikh soyedineniy. M.: Nauka, 1973. 297 p.
5. Fiedor J., Burda K. Potential role of carotenoids as antioxidants in human health and disease. *Nutrients*. 2014. No. 6(2), P. 466–488. DOI: 10.3390/nu6020466.
6. Fotia M. C., Amorati R. Non-phenolic radical-trapping antioxidants. *J. Pharm. Pharmacol.* 2009. Vol. 61(11). P. 1435–1448. DOI:10.1211/jpp/61.11.0002.
7. Halliwell B., Gutteridge J. M. Free radicals in biology and medicine. 5th edn. Oxford University Press, Oxford, 2015. 944 p.
8. Ingold K. U., Pratt D. A. Advances in radical-trapping antioxidant chemistry in the 21st century: a kinetics and mechanisms perspective. *Chemical reviews*. 2014. No. 114(18). P. 9022–9046. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr500226n>.
9. Kamei M., Nishimura H., Takahashi T., Takahashi N., Inokuchi K., Mato T., Takahashi K. Anti-influenza virus effects of cocoa. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2016. No. 96(4). P. 1150–1158. DOI: 10.1002/jsfa.7197.
10. Klucakova M. Conductometric study of the dissociation behavior of humic and fulvic acids. *Reactive and Functional Polymers*. 2018. Vol. 128. P. 24–28. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2018.04.017.
11. Kostyuk V. A., Potapovitch A. I. Superoxide-driven Oxidation of Quercetin and a Simple Sensitive Assay for Determination of Superoxide Dismutase. *Biochem. Int.* 1989. Vol. 19(5). P. 1117–1124.
12. Levy E., Delvin E., Marcil V., Spahis S. Can phytotherapy with polyphenols serve as a powerful approach for the prevention and therapy tool of novel coronavirus disease 2019 (COVID-19)? *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism*. 2020. Vol. 319(4). P. 689–708. DOI: 10.1152/ajpendo.00298.2020.
13. Mignone R. A., Martin M. V., Vieyra F. E. M., Palazzi V. I., de Mishima B. L., Martire D. O., Borsarelli C. D. Modulation of Optical Properties of Dissolved Humic Substances by their Molecular Complexity. *Photochem.*

- Photochem. Photobiol.*, 88(4): 792–800. DOI: 10.1111/j.1751-1097.2012.01135.x.
14. Nenadis, N., Lazaridou, O., Tsimidou, M. Z. (2007). Use of Reference Compounds in Antioxidant Activity Assessment. *J. Agric. Food Chem.*, 55(14): 5452–5460. DOI: 10.1021/jf070473q.
15. Sawyer, D. T., Calderwood, T. S., Johlman, C. L. (1985). Oxidation by Superoxide Ion of Catechols, Ascorbic Acid, Dehydrophenazine, and Reduced Flavins to Their Respective Anion Radicals. A Common Mechanism via a Sequential Proton – Hydrogen Atom Transfer. *J. Org. Chem.*, 50: 1409–1412.
16. Sen, C. K., Packer, L. (2000). Handbook of oxidants and antioxidants in exercise. Elsevier Science B.V., 1207 p.
17. Souza, F., Braganca, S. R. (2018). Extraction and characterization of humic acid from coal for the application as dispersant of ceramic powders. *Journal of Materials Research and Technology*, 7 (3): 254–260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.08.008>.
18. Suresh, A. K., Sharma, M. M., Sridhar, T. (2000). Engineering Aspects of Industrial Liquid-Phase Air Oxidation of Hydrocarbons. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39(11): 3958–3997. DOI:10.1021/ie0002733.
19. Wagner, A. E., Rimbach, G. (2009). Ascorbigen: chemistry, occurrence, and biologic properties. *Clinics in Dermatology*, 27(2): 217–224. DOI: 10.1016/j.clindermatol.2008.01.012.
20. Wawrzyniak, A., Górnicka, M., Hamułka, T. (2013).  $\alpha$ -Tocopherol, ascorbic acid, and  $\beta$ -carotene protect against oxidative stress but reveal no direct influence on p53 expression in rats subjected to stress. *Nutr. Res.*, 33(10): 868–875. DOI: 10.1016/j.nutres.2013.07.001.
21. Yilmaz, Y., Toledo, R. T. (2004). Major flavonoids in grape seeds and skins: antioxidant capacity of catechin, epicatechin, and gallic acid. *J. Agric. Food Chem.*, 52(2): 255–260. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/jf030117h>.
22. Zhou, Y.-C., Zheng, R. L. (1991). Phenolic compounds and an analog as superoxide anion scavengers and antioxidants. *Biochem. Pharmac.*, 42(6): 1177–1179. DOI: 10.1016/0006-2952(91)90251-y.
- Photobiol.* 2012. Vol. 88(4). P. 792–800. DOI: 10.1111/j.1751-1097.2012.01135.x.
14. Nenadis N., Lazaridou O., Tsimidou M. Z. Use of Reference Compounds in Antioxidant Activity Assessment. *J. Agric. Food Chem.* 2007. Vol. 55(14). P. 5452–5460. DOI: 10.1021/jf070473q.
15. Sawyer D. T., Calderwood T. S., Johlman C. L. Oxidation by Superoxide Ion of Catechols, Ascorbic Acid, Dehydrophenazine, and Reduced Flavins to Their Respective Anion Radicals. A Common Mechanism via a Sequential Proton – Hydrogen Atom Transfer. *J. Org. Chem.* 1985. Vol. 50. P. 1409–1412.
16. Sen C. K., Packer L. Handbook of oxidants and antioxidants in exercise. Elsevier Science B.V., 2000. 1207 p.
17. Souza F., Braganca S. R. Extraction and characterization of humic acid from coal for the application as dispersant of ceramic powders. *Journal of Materials Research and Technology*. 2018. No. 7 (3). P. 254–260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.08.008>.
18. Suresh A. K., Sharma M. M., Sridhar T. Engineering Aspects of Industrial Liquid-Phase Air Oxidation of Hydrocarbons. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2000. Vol. 39(11). P. 3958–3997. DOI:10.1021/ie0002733.
19. Wagner A. E., Rimbach G. Ascorbigen: chemistry, occurrence, and biologic properties. *Clinics in Dermatology*. 2009. No. 27 (2). P. 217–224. DOI: 10.1016/j.clindermatol.2008.01.012.
20. Wawrzyniak A., Górnicka M., Hamułka T.  $\alpha$ -Tocopherol, ascorbic acid, and  $\beta$ -carotene protect against oxidative stress but reveal no direct influence on p53 expression in rats subjected to stress. *Nutr. Res.* 2013. No. 33 (10). P. 868–875. DOI: 10.1016/j.nutres.2013.07.001.
21. Yilmaz Y., Toledo R. T. Major flavonoids in grape seeds and skins: antioxidant capacity of catechin, epicatechin, and gallic acid. *J. Agric. Food Chem.* 2004. No. 52 (2). P. 255–260. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/jf030117h>.
22. Zhou Y.-C., Zheng R. L. Phenolic compounds and an analog as superoxide anion scavengers and antioxidants. *Biochem. Pharmac.* 1991. No. 42 (6). P. 1177–1179. DOI: 10.1016/0006-2952(91)90251-y.

**EFIMOVA IRYNA**

Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher,  
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic  
and Coal Chemistry of the National Academy  
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-4374-2990>  
Scopus Author ID: 7005360428

**SMYRNOVA OLHA**

Junior Researcher,  
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic  
and Coal Chemistry of the National Academy  
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-4143-7535>  
Scopus Author ID: 57190883897  
E-mail: [79osmi@gmail.com](mailto:79osmi@gmail.com)

**BESSARABOV VOLODYMYR**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Department of Industrial Pharmacy,  
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-0637-1729>  
Scopus Author ID: 36917184700  
Researcher ID: D-3425-2017;  
E-mail: [v.bessarabov@kyivpharma.eu](mailto:v.bessarabov@kyivpharma.eu)

**<sup>1</sup>EFIMOVA I. V., SMYRNOVA O. V., BESSARABOV V. I.**

<sup>1</sup>L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry  
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**STUDY OF THE ACTION OF BINARY ANTIOXIDANT COMPOSITIONS  
WITH ASCORBIC ACID ON MODEL SYSTEMS**

**Abstract.** The issue of creating antioxidant compositions with improved and more effective properties has become relevant in recent years due to the increasing prevalence of influenza, pneumonia and other respiratory diseases, the mechanism of which is based on free radical processes. The combined use of antioxidants contributes to more effective inhibition of free radical oxidation of membrane lipids (ascorbic acid with vitamin E, A, flavonoids, carotenoids, glutathione). Understanding the exact characteristics and properties of natural bioprotectors deepens the understanding of the basic mechanisms of interaction between antioxidants. The use of model systems makes it possible to study complex and multifaceted oxidation processes in which ascorbic acid participates in vivo. As model systems, it is convenient to use radical-chain oxidation of organic substrates in an aprotic environment - a process in which all elementary stages have been almost perfectly studied and their kinetic parameters have been obtained.

**Purpose.** To establish the physicochemical regularities of oxidation processes in the presence of antioxidant compositions of ascorbic acid with an oxygen radical anion, humic and hematmelanic acids, as well as to identify the possibility of regulating the antioxidant and prooxidant properties of these supramolecular inhibitory systems in radical chain processes.

**Methodology.** The initiated oxidation of cumene in an aprotic medium in the presence of antioxidant compositions of ascorbic acid with an oxygen radical anion, humic and hematmelanic acids was investigated by measuring the change in absorbed molecular oxygen.

**Findings.** In the presented work, based on the initiated radical-chain oxidation process of cumene in an aprotic environment (model system), the antioxidant effect of binary compositions of ascorbic acid with some representatives of inhibitors of natural origin was studied. The peculiarities of the oxidation course of the model system in the presence of humic and hematmelanic acids were studied, and their antioxidant properties were proven. An increase in the inhibitory effect of humic substances on the oxidation process of cumene was observed with an increase in their concentration in the model system. It was also proven that with an increase in the concentration of these binary compounds in the studied system, the protective efficiency increases. The effect of the supramolecular composition of ascorbic acid and the oxygen radical anion on the oxidation process of the model system was studied. It was shown that the combined effect of ascorbic acid and superoxide anion is inhibitory, and this effect increases with an increase in the concentration of the antioxidant complex in the studied system.

**Originality.** It was found that during the oxidation of the model system, the complex inhibitory effect of the antioxidant composition of ascorbic acid and humic substances from brown coal has an additive effect.

*The induction effect, caused by the presence of the antioxidant composition of ascorbic acid with superoxide anion, is synergistic in nature, for which the optimal ratio of the amount of oxygen radical anion and ascorbic acid in the antioxidant composition for maximum synergistic effect was found.*

**Practical value.** *The mediator participation of the oxygen radical anion in the oxidation processes of the model system in the presence of ascorbic acid has been experimentally confirmed, which can contribute to the understanding of the mechanisms of many pathological conditions caused by free radical oxidation processes. The relevance of using the given model system for further studying the antioxidant action of humic substances and antioxidant compositions based on them has been proven.*

**Keywords:** *ascorbic acid; antioxidants; inhibition; synergism; additivity.*

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.5.10>

УДК 678.746

ЛЯШОК І. О., ПЛАВАН В. П., КРЮКОВА О. А., ПОЛУШКІН М. М.,  
ШВЕЦЬ В. В., ШАПОВАЛОВА Я. С.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

### ВПЛИВ ПОЛІСАХАРИДІВ НА ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК ТА ГІДРОГЕЛІВ ПВС НА ОСНОВІ ВОДНОГО ЕКСТРАКТУ РОМАШКИ ЛІКАРСЬКОЇ (*MATRICARIA CHAMOMILLA*)

**Мета.** Встановити вплив полісахаридів на фізичні властивості плівок та гідрогелів полівінілового спирту (ПВС) на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla*.

**Методика.** Композиції на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* готували при змішуванні розчинів 10% ПВС, 10% крохмалю (Кр) та/або 5% карбоксиметилкрохмалю (КМК) у співвідношенні ПВС/Кр та ПВС/КМК як 1:1. Гідрогелі отримували шляхом одноразового заморожування композицій протягом 24 годин при температурі  $-15^{\circ}\text{C}$ , а плівки – способом поливу з подальшим висушуванням при нормальних умовах. Сорбційні характеристики гідрогелів та плівок визначали гравіметричним методом по відношенню до дистильованої води та фізіологічного розчину NaCl. Реологічні дослідження композицій ПВС, ПВС/Кр, ПВС/КМК проводили за допомогою ротаційного віскозиметра NDJ-9S (КНР) згідно з ДСТУ 33–2003.

**Результати.** Доведено, що наявність у складі гідрогелів на основі водного екстракту ромашки лікарської, крохмалю та карбоксиметилкрохмалю призводить до зменшення ступеню набрякання у дистильованій воді на 28% та 77% та у фізіологічному розчині на 64% та 135% відповідно. Доведено, що при кімнатній температурі всі досліджувані зразки гідрогелів висихають за 30 годин до значення вологовмісту у межах 100%. Встановлено, що наявність у складі плівок крохмалю та карбоксиметилкрохмалю призводить до збільшення ступеню набрякання у дистильованій воді на 55% та 107% відповідно, і до зменшення ступеню набрякання у фізіологічному розчині на 13% та 40% відповідно. Доведено, що додавання до розчину ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* розчинів Кр та КМК призводить до зниження в'язкості при збільшенні напруження зсуву плівок.

**Наукова новизна.** Доведена можливість отримання плівок та гідрогелів ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* з додаванням полісахаридів у вигляді Кр та КМК. Встановлено, що сорбційна здатність гідрогелів у дистильованій воді та фізіологічному розчині NaCl збільшувалася при введенні полісахаридів, а для плівок – ступінь набрякання у дистильованій воді збільшується, а у фізіологічному розчині NaCl знижується. Доведено, що в'язкість досліджуваних полімерних систем знижується зі збільшенням напруження зсуву при введенні в композицію Кр та КМК.

**Практична значимість.** Розроблена технологія виготовлення плівок та гідрогелів ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* з додаванням полісахаридів у вигляді Кр та КМК, досліджений вплив останніх на фізичні властивості полімерних композицій та виробів на їх основі. Надані рекомендації щодо можливості застосування в косметичній ПВС плівок та гідрогелів на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* з урахуванням їх сорбційних властивостей.

**Ключові слова:** полівініловий спирт; крохмаль; карбоксиметилкрохмаль; ромашка лікарська *Matricaria chamomilla*; гідрогель; плівки; фізичні властивості.

**Вступ.** Гідрофільні полімерні плівки і гідрогелі – це сучасні біосумісні матеріали, які звожують шкіру, вбирають ексудати, випаровують зайву воду, а також зберігають тонкий шар на поверхні шкіри, який додатково зупиняє трансепідермальну втрату вологи, що допомагає прискорити процес загоєння. У медицині досить широко використовуються плівки на основі різних полімерів, таких як колаген, полівінілхлорид і поліетилен, поліпропілен, полівініловий спирт та ін. [1].

Полівініловий спирт (ПВС), завдяки своїй хімічній універсальності, є потенційним агентом для різних фармацевтичних, біомедичних та косметичних застосувань. ПВС водорозчинний і біосумісний полімер з високими показниками адгезивності та набрякання, що

робить його придатним для виготовлення різних систем доставки ліків та/або матеріалів косметичного призначення, в яких шляхом маніпулювання властивостями або зміни процесу приготування, включаючи тип і концентрацію зшивок в гідрогелевому матеріалі, можна регулювати кінетику вивільнення активних інгредієнтів з контролем набрякання [2–4].

Більшість плівкових матеріалів на основі ПВС володіють задовільними фізико-механічними властивостями і зручні у використанні, але газо- і вологопроникність не в повній мірі відповідають вимогам до пов'язок для шкіри. Для вирішення цієї проблеми у плівкових покриттях роблять отвори, проникні для газів, але непроникні для мікроорганізмів, щоб відводити зайву вологу. Така пов'язка на рану прозора і дозволяє спостерігати за процесом загоєння, не знімаючи пов'язку. Для додання лікувальних властивостей препарат вводять в полімерну матрицю [5]. Альтернативою синтетичним лікарським засобам є використання рослинних екстрактів, які є менш токсичними і не мають побічних ефектів [6, 7].

В роботі, як основу для створення плівок та гідрогелей, використано водний екстракт ромашки лікарської, яка має протизапальний, заспокійливий, кровоспинний, знеболювальний, антигістамінний та противірусний ефект, знімає спазм, прискорює регенерацію епітелію, зупиняє процеси гниття і бродіння.

Суцвіття ромашки містять 0,2–0,8% ефірної олії, сесквітерпенові вуглеводи; сесквітерпенові спирти (бізаболл, бізаболлоксид, кетоспирт); сесквітерпенові лектони матрицин і матрикарин, флавоноїди, кумарини, ситостерин, холін, полісахариди, каротин, аскорбінову, ізовалер'янову, каприлову та інші органічні кислоти [8].

Розширення асортименту плівкових та гідрогелевих матеріалів медичного та косметологічного призначення на основі біосумісних полімерів з додаванням фітокомпонентів є актуальним завданням. Особливий інтерес, як пролонгатори дії активних інгредієнтів у полімерних композиціях, представляють полісахариди: крохмаль (Кр) та карбоксиметилкрохмаль (КМК). З метою дослідження впливу природи полісахаридів в композиції ПВС на основі екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* в роботі проводили аналіз сорбційних властивостей плівок та гідрогелів ПВС/Кр, ПВС/КМК. Досліджували кінетику їх набрякання в дистильованій воді та фізіологічному розчині NaCl протягом 72 годин.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розробка технології виготовлення плівок і гідрогелів ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* та визначення впливу додавання крохмалю та карбоксиметилкрохмалю на їх властивості.

**Методологія досліджень.** Як основу гідрогелевих матеріалів використовували ПВС марки 16/1, масова частка ацетатних груп не більше 0,9–1,7%, картопляний крохмаль ДСТУ 4286:2004 та карбоксиметильований крохмаль CAS: 9063-38-1. Для створення розчинів ПВС, Кр та КМК готували водний екстракт ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* у співвідношенні 100 г сухої сировини квітів *Matricaria chamomilla* на 1 л дистильованої води. Проводили настоювання на водяній бані протягом 40 хвилин при температурі екстракції 85 °С. Після охолодження проводили фільтрацію через складчастий фільтр для виключення попадання частин рослин у екстракт. На основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* готували на водяній бані 10% розчин ПВС, 10% розчин Кр і при кімнатній температурі 5% розчин КМК та змішували у співвідношенні 1:1 композиції ПВС/Кр та ПВС/КМК.

Методика одержання гідрогелів полягає у заморожуванні композицій ПВС, ПВС/Кр та ПВС/КМК при температурі -15 °С протягом 24 годин з наступним поступовим розморожуванням при кімнатній температурі. При цьому кріоструктурування ПВС компонента відбувається при заморожуванні, а Кр і КМК – при розморожуванні [9, 10]. Плівки отримували методом поливу та висушуванням при кімнатній температурі протягом 48 годин.

Сорбційні властивості плівкових та гідрогелевих матеріалів оцінювали із застосуванням вагового методу за зміною ступеню набрякання  $X$  (%) за розрахунковою формулою:

$$X = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\%,$$

де  $m_2$  – маса зразка в певний момент часу перебування у воді, г;  $m_1$  – маса сухого зразка, г.

Реологічні дослідження композицій ПВС, ПВС/Кр, ПВС/КМК проводили за допомогою ротаційного віскозиметра NDJ-9S (КНР) згідно з ДСТУ 33-2003.

Залежності напруження та швидкості деформації дають можливість отримати інформацію про властивості, структуру та перетворення полімерної системи. Найбільш важливим показником з практичної точки зору є величина в'язкості розчину полімерних композицій ПВС, ПВС/Кр та ПВС/КМК на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla*. В'язкість визначається, як співвідношення між напруженням зсуву  $\tau$  та градієнтом швидкості зсуву  $\gamma$  за формулою:  $\eta = \tau/\gamma$ .

Для характеристик структурних змін, які відбуваються під дією напруження зсуву, застосовують показник індексу течії розчину  $n$ :  $n = d \lg \tau / d \lg \gamma$ . Для ньютонівських рідин  $n = 1$ , але з ростом структурованості розчину та збільшенням аномальної в'язкості течії показник  $n$  знижується.

#### Результати дослідження.

На першому етапі роботи досліджували сорбційні властивості плівкових та гідрогелевих матриць ПВС/Кр та ПВС/КМК на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla*. На рис. 1 наведено криві сорбції гідрогелів полівінілового спирту з Кр або КМК на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla*.

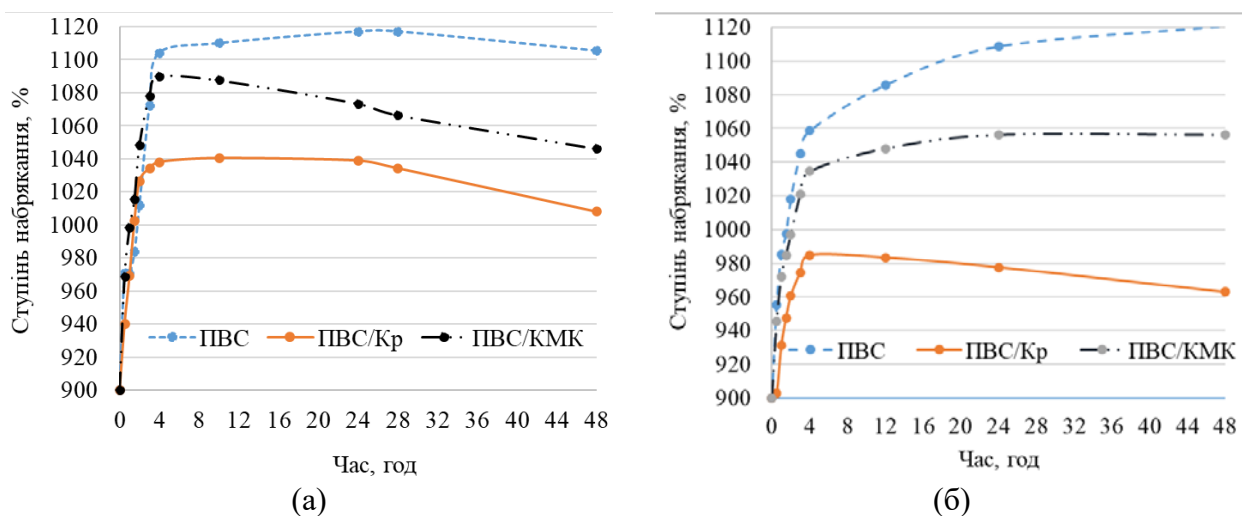


Рис. 1. Сорбція дистильованої води (а) та фізіологічного розчину (б) гідрогелів ПВС на основі екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla*

Для зразків гідрогелів ПВС на основі екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* через 8 годин встановлюється рівноважне значення ступеню набрякання у дистильованій воді (рис. 1 а), що свідчить про утворення під час кріоструктурування просторово зшитої структури з обмеженим набряканням. Для зразків ПВС/Кр та ПВС/КМК через 8 годин перебування у дистильованій воді показник ступеню набрякання досягає максимального значення, після чого знижується через 48 годин на 32% та 41% відповідно до рівноважного значення. Зниження ступеню набрякання через 24 години у дистильованій воді може бути пов'язано з вивільненням екстракту ромашки, що візуально фіксується появою характерного забарвлення розчину при збереженні цілісності гідрогелю.

Для кривих сорбції фізіологічного розчину NaCl (рис. 1б) максимальний і рівноважний ступінь набрякання гідрогелів настає для зразків ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* через 48 годин, а для ПВС/КМК через 24 години, і становить 1120% та 1056% відповідно. Для зразків гідрогелів ПВС/Кр через 4 години після початку перебування у фізіологічному розчині NaCl настає максимальний ступінь набрякання 984%, після чого протягом наступних 44 годин ступінь набрякання знижується на 20%. Це може бути пов'язано з вивільненням екстракту ромашки, як і у випадку набрякання зразків у дистильованій воді.

При порівнянні кривих сорбції гідрогелів через 4 години перебування у дистильованій воді та фізіологічному розчині гідрогелі ПВС на основі ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* за ступенем набрякання розташовані у порядку зростання ПВС/Кр → ПВС/КМК → ПВС. Тобто найнижчий ступінь набрякання спостерігається у гідрогелевих композиціях ПВС/Кр.

Встановлено, що введення полісахаридів Кр та КМК у склад гідрогелів ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* знижує їх рівноважну сорбційну здатність щодо гідрогелів ПВС на 64% та 135% відповідно для фізіологічного розчину NaCl та на 28% і 77% відповідно для дистильованої води.

Для гідрогелів, як вологовмісних матеріалів, важливим показником є процес висихання. На рис. 2 наведені криві десорбції води з гідрогелів полівінілового спирту з Кр або КМК на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla*.

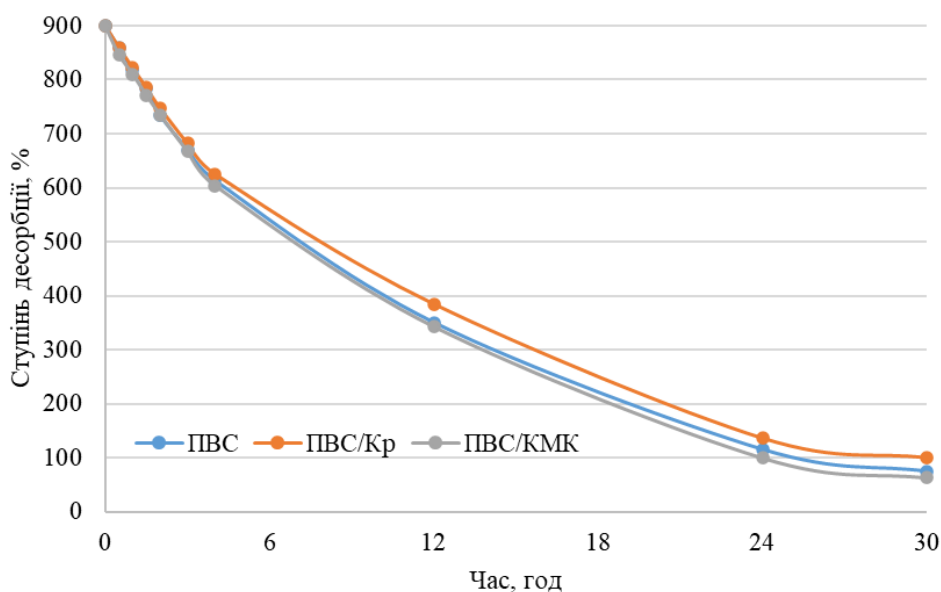


Рис. 2. Залежність десорбції води з гідрогелів ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* від часу

Як видно з рисунка, криві десорбції мають класичний вигляд і практично не відрізняються за характером та швидкістю висихання. Через 30 годин висихання встановлюється ступінь десорбції у межах 100% для всіх зразків.

В роботі були досліджені зразки плівкових полімерних матеріалів ПВС, ПВС/Кр та ПВС/КМК на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla*. На рис. 3 наведена залежність ступеню набрякання плівок у дистильованій воді (а) та фізіологічному розчині (б) від часу занурення зразків плівок на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla*.

Криві сорбції для всіх зразків плівок ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* мають класичний для кристалічних полімерних матеріалів характер. Для плівок ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* значення максимального та рівноважного ступеню набрякання у дистильованій воді та фізіологічному розчині практично співпадають та складають 155% та 150% відповідно.

Для зразків плівок ПВС/Кр на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* максимальний ступінь набрякання у фізіологічному розчині NaCl – 150%, а рівноважний – 130%. У дистильованій воді ці ж зразки набрякали на 55% більше, при цьому максимальний ступінь набрякання (205%) практично співпав з рівноважним (200%).

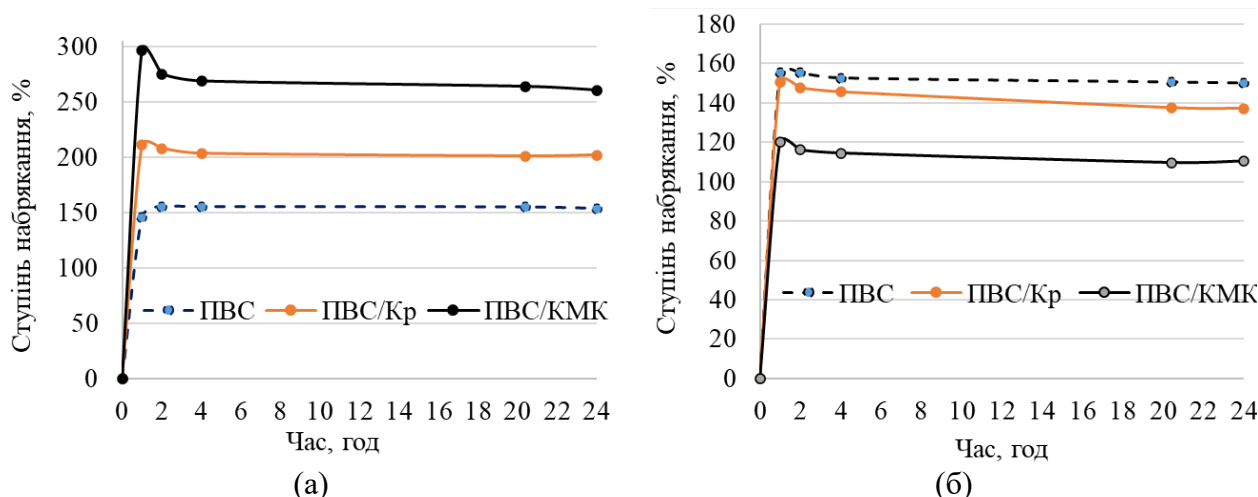


Рис. 3. Сорбція дистильованої води (а) та фізіологічного розчину (б) з плівок ПВС на основі екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla*

Для зразків плівок ПВС/КМК на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* максимальний ступінь набрякання у фізіологічному розчині складає 120%, а рівноважний 110%, тоді як при набряканні у дистильованій воді ці показники становлять 300% та 260%.

Для плівок з додаванням Кр та КМК характерний пік на кривих сорбції через 1 годину набрякання та його спад на 2-ій годині досліду. Це може бути пов'язано з вивільненням частини екстракту ромашки, що візуально фіксується появою характерного забарвлення розчину при збереженні цілісності плівок. При порівнянні кривих сорбції плівок у дистильованій воді за зростанням ступеню набрякання спостерігається така послідовність: ПВС→ПВС/Кр→ПВС/КМК; у фізіологічному розчині має місце послідовність протилежного характеру: ПВС/КМК→ПВС/Кр→ПВС. Отже, наявність у складі плівок ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* полісахаридів Кр та КМК призводить до збільшення ступеню набрякання у дистильованій воді і до зменшення ступеню набрякання у фізіологічному розчині.

Важливими технологічними характеристиками полімерних систем є їх реологічні властивості, які характеризують поведінку при деформації. На рис. 4 наведено залежність в'язкості розчину полімерної композиції на основі екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* ПВС, ПВС/Кр та ПВС/КМК у співвідношенні 1:1 від швидкості зсуву.

Як видно з рис. 4, для 10%-го розчину ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* зі збільшенням швидкості зсуву відбувається зростання в'язкості системи. Для композицій ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* з додаванням Кр та КМК зі збільшенням швидкості зсуву відбувається аномальне зниження в'язкості, як і для більшості полімерних систем.

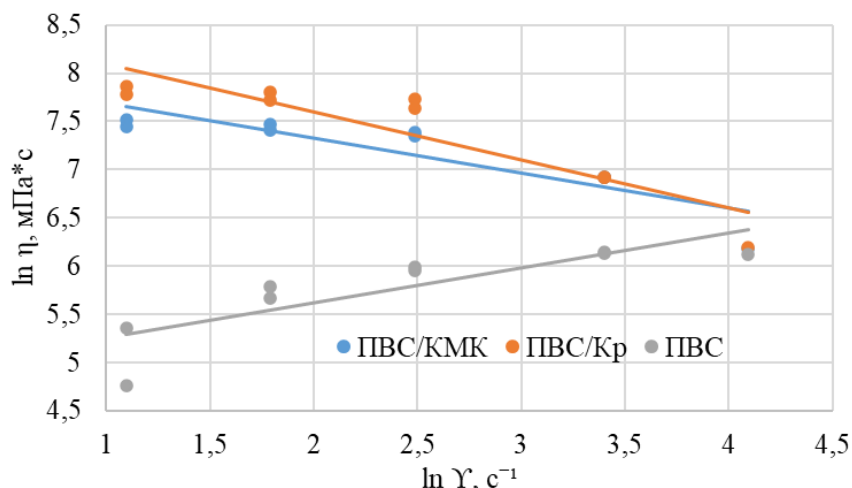


Рис. 4. Залежність в'язкості розчинів полімерної композиції ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* від швидкості зсуву

В досліджуваному інтервалі швидкостей зсуву в'язкість розчинів композиції ПВС, ПВС/Кр та ПВС/КМК на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* відповідає ступеневому закону та описується рівнянням Оствальда–де-Вілла:  $\eta = K \dot{\gamma}^{n-1}$ , де  $K$  – коефіцієнт консистенції, що залежить як від природи матеріалу, так і від виду вимірювальної апаратури;  $n$  – індекс течії.

За рівняннями ліній тренду в роботі було визначено константи  $K$  та  $n$  рівняння Оствальда–де-Вілла для розчинів досліджуваних композицій (таблиця).

Таблиця 1

**Розрахункові значення констант  $K$  та  $n$  рівняння Оствальда–де-Вілла для розчинів ПВС, ПВС/Кр та ПВС/КМК на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla***

Композиція	Рівняння лінії тренду	$R^2$	$n$	$K$
ПВС	$y = 0,3608x + 4,9015$	0,9061	0,639	4,9015
ПВС/Кр	$y = -0,4989x + 8,596$	0,8071	1,4989	8,596
ПВС/КМК	$y = -0,362x + 8,0499$	0,8650	1,362	8,0499

Аналізуючи отримані дані, встановлено, що для розчину ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla*  $n < 1$ , що характеризує його як псевдопластичну композицію, для якої в'язкість рідини зменшується при збільшенні напруження зсуву. При додаванні в композицію ПВС полісахаридів Кр та КМК індекс течії розчину  $n$  зростає порівняно з чистими розчинами ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla*, що, ймовірно, пов'язане зі зниженням структурованості системи. Розчини ПВС/Кр та ПВС/КМК із співвідношенням 1:1, для яких  $n > 1$  при збільшенні коефіцієнту  $K$ , називають дилатантними рідинами, тобто системами, у яких в'язкість зростає при збільшенні швидкості деформації зсуву. Отже, додавання до композиції ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* полісахаридів Кр та КМК сприяє переходу до неньютонівського характеру течії, яка властива дилатантним рідинам, що може бути враховано у подальшому в технологічних параметрах виготовлення плівок та гідрогелів ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla*.

**Висновки.** Таким чином, в роботі доведена можливість отримання плівок та гідрогелів на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* з додаванням полісахаридів. Встановлено, що введення полісахаридів Кр та КМК у склад гідрогелів ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* знижує їх сорбційну

здатність щодо гідрогелів ПВС на 135% та 64% відповідно для фізіологічного розчину NaCl; на 77% та 28% відповідно для дистильованої води. Для всіх досліджуваних зразків гідрогелів через 30 годин висихання за кімнатної температури встановлюється рівноважний вологовміст у межах 100%.

При дослідженні сорбції плівок ПВС, ПВС/Кр та ПВС/КМК на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* встановлено, що при набряканні у дистильованій воді введення у композицію Кр та КМК призводить до збільшення ступеню набрякання у порівнянні з плівками ПВС на 55% та 107% відповідно. А при набряканні у фізіологічному розчині NaCl призводить до зменшення ступеню набрякання у порівнянні з плівками ПВС на 13% та 40% відповідно.

Доведено, що введення в композицію ПВС на основі водного екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* полісахаридів Кр та КМК знижує в'язкість досліджуваних полімерних композицій зі збільшенням напруження зсуву, що характерно для дилатантних рідин.

Подальші дослідження будуть проведені у напрямку визначення характеру вивільнення активних інгредієнтів екстракту ромашки лікарської *Matricaria chamomilla* для встановлення ефективності використання плівок та гідрогелів на основі рослинних екстрактів в космецевтиці.

## References

1. Krykhovets, O. V., Slobodanyk, V. H. (2023). Doslidzhennia plivok na osnovi polivinilovoho spyrtu yak ekolohichnoho hnuchkoho pakuvannia [Research on polyvinyl alcohol-based films as ecological flexible packaging]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu = Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, No. 2, P. 15–20. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi\\_2023\\_2\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2023_2_4) [in Ukrainian].
2. Popescu, M.C. (2017). Structure and sorption properties of CNC reinforced PVA films. *International journal of biological macromolecules*, No. 101, P. 783–790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.168>.
3. Jiang, S., Liu, S., Feng, W. (2011). PVA hydrogel properties for biomedical application. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, No. 4 (7), P. 1228–1233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.04.005>.
4. Kamoun, E. A., Kenawy, E. R., Chen, X. A. (2017). Review on polymeric hydrogel membranes for wound dressing applications: PVA-based hydrogel dressings. *Journal of advanced research*, No. 8 (3), P. 217–233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.01.005>.
5. Kupriianova, O. M., Khokhlenkova, N. V., Yarkykh, T. H. (2011). Vyvchennia aktualnosti rozrobky novykh pereviazuvalnykh zasobiv z vykorystanniam syrovyny pryrodnoho pokhodzhennia [Study of the relevance of developing new dressings using raw materials of natural origin]. *Zaporozhskiy medytsynskiy zhurnal = Zaporizhzhia Medical Journal*, No. 13 (4), P. 114–115 [in Ukrainian].

## Література

1. Криховець О. В., Слободяник В. Г. Дослідження плівок на основі полівінілового спирту як екологічного гнучкого пакування. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 2. С. 15–20. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi\\_2023\\_2\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2023_2_4).
2. Popescu M. C. Structure and sorption properties of CNC reinforced PVA films. *International journal of biological macromolecules*. 2017. No. 101. P. 783–790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.168>.
3. Jiang S., Liu S., Feng W. PVA hydrogel properties for biomedical application. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 2011. No. 4 (7). P. 1228–1233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.04.005>.
4. Kamoun E. A., Kenawy E. R., Chen X. A. Review on polymeric hydrogel membranes for wound dressing applications: PVA-based hydrogel dressings. *Journal of advanced research*. 2017. No. 8(3). P. 217–233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.01.005>.
5. Купріянова О. М., Хохленкова Н. В., Ярких Т. Г. Вивчення актуальності розробки нових перев'язувальних засобів з використанням сировини природного походження. *Запорізький медичний журнал*. 2011. № 13 (4). С. 114–115.

6. Suberliak, S. A., Petrina, R. O., Hrytsenko, O. M., Fedorova, O. V. (2020). Antymikrobna aktyvnist' hidrohelevykh materialiv na osnovi kopolimeriv polivinilpyrrolidonu v kompleksi z ekstraktamy Calendula Officinalis i Arnica Montana [Antimicrobial activity of hydrogel materials based on polyvinylpyrrolidone copolymers in combination with extracts of Calendula Officinalis and Arnica Montana]. *Chemistry, Tehnology and Application of Substances*, No. 3 (1), P. 135–141. DOI: <https://doi.org/10.23939/ctas2020.01.135> [in Ukrainian].
7. Nikitina, O. O., Robak, A. Yu., Tsyba, D. S. (2024). Innovatsiini pidkhody do vykorystannia likarskykh roslyn u suchasni farmatsevytsi [Innovative approaches to the use of medicinal plants in modern pharmaceuticals]. *Tekhnologii ta inzhynirynh = Technologies and engineering*, № 3 (20), P. 110–126. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.3.9> [in Ukrainian].
8. Mustafakulovna, M. M., Kurbonaliyeva, S. M. (2022). Pharmacological action of the components of chamomile pharmacy and its use in cosmetics. *World Bulletin of Public Health*, No. 17, P. 90–93. URL: <https://www.scholarexpress.net> [in Ukrainian].
9. Meirelles, L. M., Raffin, F. N. (2017). Clay and polymer-based composites applied to drug release: A scientific and technological prospection. *Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*, No. 20, P. 115–134. DOI: <https://doi.org/10.18433/J3R617>.
10. Liashok, I. O., Plavan, V. P., Ishchenko, O. V., Hodunko, A. A., Shvets, V. V. (2023). Vlastyvoli hibrydnykh hidroheliiv z dodavanniam modyfikovanoho krokhmaliiu ta hliny montmorylonitovoho typu [Properties of hybrid hydrogels with the addition of modified starch and montmorillonite-type clay]. *Tekhnologii ta inzhynirynh = Technologies and Engineering*, No. 3 (14), P. 47–55. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.5> [in Ukrainian].
6. Суберляк С. А., Петріна Р. О., Гриценко О. М., Федорова О. В. Антимікробна активність гідрогелевих матеріалів на основі кополімерів полівінілпіролідону в комплексі з екстрактами Calendula Officinalis i Arnica Montana. *Chemistry, Tehnology and Application of Substances*. 2020. № 3 (1). P. 135–141. DOI: <https://doi.org/10.23939/ctas2020.01.135>.
7. Нікітіна О. О., Робак А. Ю., Циба Д. С. Інноваційні підходи до використання лікарських рослин у сучасній фармацевтиці. *Технології та інжиніринг*. 2024. № 3 (20). С. 110–126. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.3.9>.
8. Mustafakulovna M. M., Kurbonaliyeva S. M. Pharmacological action of the components of chamomile pharmacy and its use in cosmetics. *World Bulletin of Public Health*. 2022. No. 17. P. 90–93. URL: <https://www.scholarexpress.net>.
9. Meirelles, L. M., Raffin, F. N. Clay and polymer-based composites applied to drug release: A scientific and technological prospection. *Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*. 2017. № 20. P. 115–134. DOI: <https://doi.org/10.18433/J3R617>.
10. Ляшок І. О., Плаван В. П., Іщенко О. В., Годунко А. А., Швець В. В. Властивості гібридних гідрогелів з додаванням модифікованого крохмалю та глини монтмориленітового типу. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 3 (14). С. 47–55. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.5>.

**LIASHOK IRINA**

Associate Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-9171-1075>

Scopus Author ID: 6508201621

Researcher ID: rid47052

E-mail: [lyashok.io@knuud.com.ua](mailto:lyashok.io@knuud.com.ua)

**KRYUKOVA OLENA**

Associate Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-8638-3580>

Scopus Author ID: 24335433200

E-mail: [kryukova.oa@knuud.com.ua](mailto:kryukova.oa@knuud.com.ua)

**PLAVAN VIKTORIYA**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<http://orcid.org/0000-0001-9559-8962>

Scopus Author ID: 6603130130

Researcher ID: I-5852-2015

E-mail: [plavan.vp@knuud.edu.ua](mailto:plavan.vp@knuud.edu.ua)

**SHVETS VYACHESLAV**

Postgraduate Student, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

E-mail: [svyev2528@gmail.com](mailto:svyev2528@gmail.com)

**POLUSHKIN MAXIM**

Student, Department of Chemical Technologies and  
Resource Saving, Kyiv National University of  
Technologies and Design, Ukraine  
E-mail: [djonnidjostar19@gmail.com](mailto:djonnidjostar19@gmail.com)

**SHAPOVALOVA YANA**

Student, Department of Chemical Technologies and  
Resource Saving, Kyiv National University of  
Technologies and Design, Ukraine  
E-mail: [shapovalova85@gmail.com](mailto:shapovalova85@gmail.com)

**LIASHOK I. O., PLAVAN V. P., KRYUKOVA O. A.,  
POLUSHKIN M. M., SHVETS V. V., SHAPOVALOVA Ya. S.**

*Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine*

**INFLUENCE OF POLYSACCHARIDES ON PHYSICAL PROPERTIES  
OF PVA FILMS AND HYDROGELS BASED ON AQUEOUS EXTRACT  
OF THE MEDICINAL CHAMOMILE (*MATRICARIA CHAMOMILLA*)**

**Purpose.** To determine the influence of polysaccharides on the physical properties of films and hydrogels composed of polyvinyl alcohol (PVA) based on the aqueous extract of the medicinal chamomile *Matricaria chamomilla*.

**Methodology.** Compositions based on the aqueous extract of medicinal chamomile *Matricaria chamomilla* 10% PVA, 10% Kr and 5% KMK were prepared by mixing PVA/Kr and PVA/KMK solutions in a ratio of 1/1. Hydrogels were obtained by one-time freezing of compositions for 24 hours at a temperature of -15 °C, and films by the method of watering with subsequent drying under normal conditions. Sorption characteristics of hydrogels and films were determined by the gravimetric method in relation to distilled water and physiological NaCl solution. Rheological studies of PVA, PVA/Kr, PVA/KMK compositions were carried out using a rotary viscometer NDJ-9S (PRC) in accordance with DSTU 33–2003.

**Findings.** It was established that the presence of medicinal starch and carboxymethyl starch in the composition of hydrogels based on the aqueous extract of chamomile leads to a decrease in the degree of swelling in distilled water and in physiological solution. It has been proven that the presence of starch and carboxymethyl starch polysaccharides in the composition of hydrogels based on the aqueous extract of chamomile leads to a decrease in the percentage of swelling in distilled water by 28% and 77% and in physiological solution by 64% and 135%, respectively. It has been proven that at room temperature all studied hydrogel samples dry in 30 hours to a moisture content within 100%. It was established that the presence of starch and carboxymethyl starch polysaccharides in the composition of the films leads to an increase in the percentage of the degree of swelling in distilled water by 55% and 107%, respectively, and to a decrease in the degree of swelling in physiological solution by 13% and 40%, respectively. It has been proven that the addition of a PVA solution of Kr and KMK solutions to the aqueous extract of the medicinal chamomile *Matricaria chamomilla* leads to a decrease in viscosity with an increase in the shear stress of the films.

**Originality.** The possibility of obtaining films and hydrogels based on the aqueous extract of medicinal chamomile *Matricaria chamomilla* with the addition of polysaccharides has been proven. It was established that the sorption capacity of hydrogels in distilled water and physiological NaCl solution increased with the introduction of polysaccharides, and for films, the degree of swelling in distilled water increased, and in physiological NaCl solution it decreased. It has been proven that the viscosity of the studied polymer systems decreases with an increase in shear stress when the polysaccharides Kr and KMK are introduced into the composition.

**Practical value.** The technology for the production of films and hydrogels based on the aqueous extract of medicinal chamomile *Matricaria chamomilla* was developed and the effect of Kr and KMK on the physical properties of polymer compositions and products based on them was investigated. Recommendations are provided on the possibility of using PVA films and hydrogels based on the aqueous extract of *Matricaria chamomilla* in cosmeceuticals, taking into account the sorption properties.

**Keywords:** polyvinyl alcohol; starch; carboxymethyl starch; medicinal chamomile *Matricaria chamomilla*; hydrogel; films; physical properties.

УДК 675:502

СКИБА М. Є.

Хмельницький національний університет, Україна

## ЧИСТІ ТЕХНОЛОГІЇ У ШКІРЯНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

**Мета.** Узагальнити та систематизувати наведену у науково-технічній літературі інформацію про застосування у виробництві натуральної шкіри чистих технологій, які не чинять або зменшують постійний негативний вплив на навколишнє середовище.

**Методика.** Для забезпечення систематичного підходу до отримання, аналізу та інтерпретації результатів використано методи дослідження, аналізу, узгодження, узагальнення та систематизації.

**Результати.** На підставі аналізу науково-технічної літератури за останні роки розкрито сутність та значущість ресурсозберігаючих та екологічно орієнтованих технологій для сталого розвитку галузі. Сучасне виробництво натуральної шкіри передбачає перероблення природної сировини з використанням значної кількості води, електроенергії та хімічних матеріалів. Останнє спричиняє утворення великого обсягу твердих відходів, значного забруднення промислових стоків і примушує активно шукати шляхи зниження негативного впливу виробничої діяльності підприємств галузі на довкілля. Аналіз літератури відображає зростання досліджень та розробок у цьому напрямку з наголосом на стійку хімію як основу створення чистих технологій та сталого розвитку галузі. Необхідність економії природних ресурсів розширює застосування натуральних і наноматеріалів на різних етапах шкіряного виробництва. На особливу увагу заслуговує створення ферментних препаратів, впровадження яких дозволить зменшити використання або повністю виключити низку екологічно небезпечних матеріалів і позитивно впливатиме на екологічний стан як на самих підприємствах, так і навколо них. Пропонуються більш ефективні технології оброблення шкіри на різних етапах технологічного циклу, інноваційні способи очищення стічних вод, більш ефективні прийоми перероблення відходів. Ідеальним підходом до наближення галузі до внутрішньої кругової (циркулярної) економіки є використання відходів власного виробництва для оброблення шкіри.

**Наукова новизна.** Узагальнено та систематизовано інформацію щодо підходів до застосування на всіх етапах виробництва натуральної шкіри – від сировини у вигляді шкірного покриву тварин до готової продукції широкого асортименту – чистих технологій, спрямованих на дотримання принципів ресурсозбереження та зниження шкідливого екологічного навантаження на навколишнє середовище як на окремому підприємстві, так і у галузі в цілому.

**Практична значимість.** Результати вивчення та впорядкування теоретичних і практичних досягнень у шкіряному виробництві чистих технологій сприятимуть не лише розширенню знань про вдосконалення способів виготовлення натуральної шкіри у напрямку зменшення забруднення навколишнього середовища внаслідок виробничої діяльності галузевих підприємств, а й просуванню науково-технічного і технологічного розвитку галузі на більш високий рівень, а саме створення кругових (циркулярних) технологій.

**Ключові слова:** шкіряне виробництво; чисті технології; сировина; шкіра; хімічні матеріали; стічні води; відходи; навколишнє середовище.

**Вступ.** Під чистими технологіями маються на увазі такі технології, які в своєму процесі не мають або зменшують постійний негативний вплив на довкілля. Цей тип технологій сприяє збереженню навколишнього середовища. Головною причиною існування чистих технологій є не що інше, як переломлення ситуації з дисбалансом навколишнього середовища у всьому світі, яка впливає на всіх нас [1].

Постійне зростання тиску з боку ринкових сил та глобальних інститутів примушує шкіряну промисловість активно шукати рішення для зменшення свого впливу на навколишнє середовище. Це обумовлює зростання досліджень та розробок з особливим акцентом на стійку хімію як основу для створення більш відповідальної та перспективної галузі [2].

Шкіряна промисловість має значний економічний вплив; однак, вона страждає через забруднення навколишнього середовища відходами виробництва, що утворюються під час

оброблення шкіри. Процеси дублення роблять значний внесок у хімічну потребу в кисні (ХПК), загальну кількість розчинених твердих речовин, хлоридів, сульфатів і важких металів. Хімічні речовини, що скидаються у водні системи, зрештою потрапляють у сильно забруднені відкладення та засолюють річки. Така ситуація виявляє нагальну потребу у більш екологічних технологіях. На думку [3], основні категорії технічних методів можна поділити на дві групи: 1. Впровадження технологій, спрямованих на зниження забруднення стічних вод, уникнення використання шкідливих хімічних речовин та утворення твердих відходів, які можна використовувати як побічні продукти. 2. Очищення стічних вод та переробка твердих відходів екологічно безпечним способом. Оскільки обидві групи запобігають негативному впливу шкіряного виробництва на довкілля, їх поєднання визнано суттєвим. Слід зазначити, що всі технології мають бути збалансованими з численними перевагами очищення довкілля від забруднення, підвищенням продуктивності праці, сталої якості матеріалів. Використовуючи найкращі доступні технології та оптимізовані системи, шкіряна промисловість може розвиватися як екологічно чиста галузь.

**Постановка завдання.** Шкіряне виробництво – історична галузь, яка й досі має економічний вплив на весь світ. Виготовлення шкіри здійснюється шляхом послідовного виконання складних фізико-хімічних і механічних етапів з використанням великої кількості енергії, води, хімікатів та утворенням значної кількості відходів. Дослідження зі створення чистішої шкіряної промисловості проводились протягом кількох десятиліть, це призвело до поліпшення практики, економії енергії та води, більш ефективного очищення стічних вод. Проте, великою проблемою залишається управління твердими відходами. Не менш важливим питанням на сьогоднішній день є використання сполук хрому під час дублення. Існують альтернативи хромовому дубленню, але жодна з них не може зрівнятися з усіма перевагами цього способу і необхідно знайти баланс з екологічними проблемами. Для вимірювання екологічних характеристик шкіри є кілька інструментів, одним з яких є Аудит LWG (Leather Working Group). З боку споживачів є деякі надійні екологічні маркування шкіри. Нарешті, оцінка життєвого циклу (LCA) – найбільш вичерпний інструмент визначення екологічних характеристик шкіри [4]. З урахуванням викладеного, сформульована мета роботи – узагальнити та систематизувати наведену у науково-технічній літературі інформацію про застосування у виробництві натуральної шкіри чистих технологій, які не чинять або зменшують постійний негативний вплив на навколишнє середовище.

#### **Результати дослідження.**

**1. Розроблення та впровадження технологій за рахунок зменшення кількості або уникнення використання шкідливих хімічних речовин.** В огляді кращих екологічних практик у шкіряному секторі у якості критеріїв окреслено чотири виміри: надійність, застосовність, прихильність та ефективність [5]. З урахуванням цього та особливостей технології виробництва шкіри розглянемо екологічно орієнтовані практики на її основних етапах: підготовчому, переддубильно-дубильному та післядубильному (оздоблення).

**Підготовчий етап** об'єднує практики, орієнтовані на скорочення або заміну матеріалів, що мають відношення до видалення волосу, жиру, підготовки дерми до дублення.

Протягом останніх десятиліть потенційно привабливою проблемою для шкіряної промисловості стали екологічно чисті процеси оброблення шкіри, засновані на використанні натуральних продуктів. На практиці для запобігання розвитку мікроорганізмів під час відмочування застосовуються бактерициди – синтетичні захисні хімічні речовини, які спричиняють високу хімічну потребу в кисні у промислових стоках. У роботі [6] досліджено вплив дубильної кислоти на мікроорганізми, шкіру, шерсть і стоки для демонстрації можливості її застосування у відмочуванні замість загальноживаних бактерицидів. Дубильна кислота – складна органічна кислота, одна з форм танінів, синтезується великою кількістю рослин. Результати дослідження показали, що дубильна кислота знижує ХПК та вміст азоту у

стоках, тобто може бути альтернативним, екологічно чистим бактерицидом для шкіряної промисловості, зменшуючи забруднення стічних вод після відмочування.

Традиційні технології зневолошування передбачають використання великої кількості вапна та сульфїду натрію, що є небезпечним і створює серйозні проблеми з утилізацією відходів: з сульфїду натрію утворюється сірководень, що часто стає причиною смертельних випадків, а руйнування волосу підвищує рівень біологічної та хімічної потреби в кисні, загальної кількості розчинених і зважених твердих речовин. Дослідження [7] показує, що зневолошування з використанням 1,2% ферментів, отриманих з *Bacillus crolab* МТСС 5468 шляхом твердофазної ферментації, є безпечним процесом, який можна ефективно використовувати у шкіряному виробництві для зниження забруднення довкілля.

Позитивний ефект ферментного зневолошування підтверджено і рядом інших авторів [8–10]. При цьому в роботі [9] зазначається, що масштабованість та стійкість процесу залишаються проблемою для виробництва екологічно чистого ферменту, який міг би привернути увагу промисловості. Виходячи з цього, досліджено мікробну деградацію хромової стружки й отриманий гідролізат колагену для виробництва зневолошуючої протеази за допомогою VITSN04. Оптимізація середовища, що містить 12 г/л гідролізату та 5 г/л патоки, виявилась ефективною для синтезу протеази ( $170,6 \pm 0,1$  У/мл), але знизилася співсинтез амілази ( $48,2 \pm 0,09$ ) У/мл). Отримана протеаза потім розподілилася за двофазною системою і показала суттєве зневолошування козячих шкур. В іншій роботі [10] запропоновано видаляти волосся за допомогою агропромислових відходів (пшеничних висівок) разом з протеазою (ЕС 3.4.21), одержаною з твердих відходів мідріння шкур як надійного джерела вуглецю та азоту.

В Іспанії [11] встановлено доцільність заміни сульфїду натрію пероксидом водню як засобу для видалення волосся зі шкур великої рогатої худоби та рециркуляції робочих розчинів. При порівнюванні фізико-хімічних та органолептичних властивостей шкір, отриманих за двома методами, відмінностей не виявлено. Проте, встановлено значне покращення екологічної ситуації та економічних показників, на що вказують зменшення споживання води на 70%, ХПК на 35%, токсичності на 98%, загального азоту за К'ельдалем на 50%, усунення ризику утворення сірководню, і те, що запропонований метод на 16% економічніший від традиційного методу.

Ефективну систему видалення волосся з використанням окиснювально-ферментного допоміжного засобу замість екологічно небезпечного сульфїду натрію розробили індійські вчені [12]. Система доволі проста і полягає у зневолошуванні козячих шкур за допомогою 5% перкарбонату та 4% гідроксиду натрію. Повне зневолошування досягається за 16 год. Навантаження забруднення з точки зору БПК, ГПК, загальної кількості розчинених та зважених твердих речовин знижено до 52–68% порівняно з контрольною групою. Перевагою методу також є значне скорочення тривалості оброблення за рахунок виключення повторних процесів та знезолування.

Виробництво високоякісного шкіряного виробу потребує певної міри знежирювання шкур. Вміст натурального жиру у шкурі залежить від виду та походження тварин. Так, наприклад, в овечих вовняних шкурах з Австралії та Нової Зеландії цей показник може досягати до 50% від маси сухої шкіри. Зазвичай овчини знежирюють за допомогою органічних розчинників, що призводить до викиду летких органічних сполук. Альтернативні водні системи, що ґрунтуються на використанні неіоногенних ПАВ, призводять до утворення великих обсягів стічних вод з високими значеннями ГПК. Відомо про використання надкритичних рідин для вилучення ряду речовин. В процесах екстракції найбільш широко використовується надкритичний CO<sub>2</sub>. Авторами [13] розглянуто можливість застосування технології надкритичної екстракції CO<sub>2</sub> при знежирюванні овчин. Ефективність знежирювання визначали за вологістю зразка, щільністю та швидкістю потоку CO<sub>2</sub>, часом екстракції. Вміст жиру до та після екстракції аналізували за допомогою апарату Сокслета. Рівні ефективності

знежирювання до 94% отримано при екстракції овчин з вихідним вмістом натурального жиру близько 6%. Встановлено, що ефективність знежирювання знижувалася з вмістом вологи в шкірі та збільшувалася з щільністю CO<sub>2</sub>, швидкістю потоку та часом екстракції.

Через те, що звичайне знезолування солями амонію призводить до високої концентрації аміачного азоту (NH<sub>3</sub>-N) у стічних водах шкірзаводів, технологія безамонійного знезолування стає все більш популярною. Проте, існуючі безамонійні знезолуючі агенти мають недостатню буферну ємність та повільну швидкість проникнення в зелену голину. У дослідженні [14] для знезолування зелених шкур ВРХ використали гліцин з рК(а)-NH<sub>3</sub><sup>+</sup> 9,6. Гліцин проникає у голину всього за 10 хв, оскільки в результаті взаємодії між ним та лугом у шкірі швидко утворюється буфер з рН 8,0–9,5, призводячи до негативно зарядженої поверхні шкіри (ізоелектрична точка 6,3). Зовнішній вигляд та фізичні властивості шкіри Краст, отриманої після знезолування гліцином, дуже схожі на характеристики шкіри Краст у разі традиційного знезолування сульфатом амонію. Концентрація NH<sub>3</sub>-N у стічних водах після знезолування гліцином знижена на 99%. Крім того, введення додаткового джерела вуглецю значно наближає співвідношення загального органічного вуглецю (ТОС) до загального азоту (ТН) у стічних водах до співвідношення 10:1, прийнятеного для біологічного аеробного очищення. Після аеробного біологічного очищення протягом 24 год концентрація NH<sub>3</sub>-N, ТОС і ТН у стічних водах після знезолування гліцином знизилась на 99, 20 і 53% відповідно порівняно із знезолуванням сульфатом амонію.

**На етапі переддублення-дублення** екологічні проблеми в основному фокусуються на скороченні та/або заміні хромового дубителя, який може бути шкідливим для навколишнього середовища, якщо з ним неналежним чином поводитися, особливо під час оброблення виробничих відходів [15]. Для вирішення цієї проблеми авторами [16] розроблена нова технологія процесів дублення та пост-дублення, за якою пром'якшену голину перед дубленням попередньо обробляють меламіновою смолою, потім піддають двоїнню та струганню. Що стосується пост-дублення, то цілу низку процесів (хромування, додублювання, фарбування та жирування) ефективно інтегровано в одну ванну. Спочатку використовується помірна кількість барвників та жирувальних речовин, потім в ту саму ванну додають хромовий дубитель. Коли хром майже повністю продифундував, рН ванни підвищують і додають матеріали для додублювання-наповнювання. Далі застосовуються жирові емульсії. Результати всебічного аналізу показують, що функціональні властивості дослідної шкіри не мають суттєвої різниці з контрольною шкірою, одержаною за відомою технологією. Крім того, нова технологія призводить до зниження споживання води і хімічних матеріалів на 40%, а показників БПК, ХПК, вмісту зважених твердих речовин і хрому відповідно на 55,04, 58,04, 39,42 і 90%.

Для зниження тиску хромового дублення на навколишнє середовище вивчено двоетапну технологію зеленого та чистого дублення на основі поліедричного олігомерного силсесквіоксанового карбоксилату натрію (POSS-COONa) та цирконію [17]. Спочатку в результаті гідролізу та конденсації  $\gamma$ -амінопропілтріетоксисилану отримали аminosесквісилоксан, який у подальшому замінили хлорацетатом натрію для утворення POSS-COONa. Останній мав кристалічність і зберігав кубічну структуру. У поєднанні з сульфатом цирконію його застосували для дублення козячої шкіри. Порівняно з недубленою, хромовою та цирконієвою шкірою Краст температура усадки та швидкість потовщення комбінованої шкіри Краст склали 90,5 °С та 118,3% відповідно. Міцність на розрив, напруження при розтягуванні, подовження при розриві та м'якість комбінованої шкіри склали 26,4 МПа, 96,3 Н/мм, 105,5% та 6,5 мм. Результати скануючої електронної мікроскопії та енергодисперсійної спектроскопії показали, що колагенові волокна комбінованої шкіри з'єднані більш вільно, а POSS-COONa і сульфат цирконію рівномірно розподілені в дермі. Ізоелектрична точка комбінованої шкіри (~6,7) аналогічна ізоелектричній точці хромової

шкіри (~7,7). На підставі одержаних результатів POSS-COONa у поєднанні з дубленням сульфатом цирконію має широкі перспективи в екологічно чистому виробництві.

Для вирішення проблеми забруднення довкілля хромом і нейтральною сіллю авторами [18] досліджено більш екологічно чистий реагент для безпикельного дублення, синтезований з використанням натуральної амінокислоти та ціанурхлориду. Екологічно чисті матеріали та процес дублення знижують шкідливий вплив на довкілля, а властивості одержаної шкіри wet-white задовольняють вимоги споживачів.

Для покращення якості шкіри розроблено екологічно чистий процес хромового дублення з використанням ультразвуку [19]. Дослідження проводили за різних значень рН, тривалості процесу та витрати дубителя, а потім порівнювали з традиційним методом. Аналіз дубленої шкіри за допомогою скануючої електронної мікроскопії виявив відсутність негативного впливу ультразвуку на структуру волокон. Встановлено не лише скорочення тривалості дублення та кількості видаленого хрому зі шкіри підлужуванням, а і підвищення гідротермічної стійкості шкіри на 5–29 °С, ступеня поглинання та вмісту хрому на 30–50 та 1–7% відповідно. На думку авторів, досягнутий ефект обумовлений підвищенням дифузії дубильних речовин в дерму.

Метою ферментного дублення, як і дублення сполуками хрому, є перетворення шкіряної сировини на придатний для використання продукт. Для цього використовуються препарати, одержані на базі натуральних, біорозкладних ферментів. До переваг ферментного дублення слід віднести обмежене використання екологічно небезпечних речовин, одержання більш м'якої, однорідної шкіри за рахунок вибіркової дисперсії колагенової мережі шкіри при меншій витраті води та кількості утворюваних відходів. Разом з тим, повільність проникнення кислих протеаз в дерму знижує ефективність дублення. Тому подальші дослідження будуть спрямовані на регулювання взаємодії ферментів зі шкірою [20].

На етапі пост-дублення ініціативи щодо екологічних аспектів зосереджені на застосуванні менш безпечних хімічних матеріалів для оздоблення, а також на залишках, просочених хімікатами, що використовуються при дубленні, наприклад, такими як хром, які не слід утилізувати на звичайних звалищах без попередньої спеціалізованого оброблення (використання піролізу або спеціальних сміттєспалювальних печей). Багато ініціатив на цьому заключному етапі виробництва спрямовано на пошук нових підходів до переробки, скорочення утворення відходів та/або виявлення способів їх повторного використання як сировини у нових життєвих циклах.

Застосування потужного ультразвуку відіграє важливу роль у концепції чистої технології на різних стадіях виробництва шкіри. У роботі [21] вивчено ефект попереднього оброблення ультразвуком розчину барвника, а також шкіри. Джерелом потужного ультразвуку був ультразвуковий очищувач (150 Вт та 33 кГц). Одержані результати наочно демонструють потенціал використання ультразвуку як інструмента для покращення швидкості виснаження барвника та якості виробленої шкіри. Запропоновано оптимальні параметри фарбування, які забезпечують зменшення забруднення стічних вод шкірзаводу, що спричиняє велику соціальну клопотаність.

У статті [22] розглянуто вплив ультразвуку на приготування жирових емульсій та процес жирування шкіри. Виявлено зменшення розміру частинок емульсії більш, ніж на 22% та збільшення жирності шкіри на 40% завдяки використанню ультразвуку. Більш того, спостерігається плавне проникнення та рівномірний розподіл жиру в шкірі, покращення показників міцності, стійкості забарвлення та потовиділення.

Як вже зазначено, забруднення навколишнього середовища сполуками хрому призводить до необхідності розроблення більш екологічного дублення шкіри – без хрому. Але через слабкий позитивний заряд шкіра безхромового дублення не може міцно зв'язуватися з аніонними барвниками, що призводить до низької якості готової продукції. З урахуванням цього авторами [23] синтезований іонний рідкий полімер p(DM-co-[DDVIM]Br)PS.

Експериментально встановлено покращення взаємодії аніонного барвника зі шкірою у разі використання цього полімеру під час жирування. Швидкість адсорбції р(DM-co-[DDVIM]Br)PS та поглинання барвника шкірою досягла 99%; жирувальні та фарбувальні розчини були прозорими, тому їх можна використовувати як чисті матеріали під час мокрого оздоблення шкіри безхромового дублення. Шкіра, оброблена новим жируючим агентом, була м'якшою від шкіри, обробленої комерційним жируючим агентом.

Натуральні барвники привертають все більше уваги через такі свої переваги, як отримання з відновлюваних ресурсів, менша шкода для довкілля та здоров'я людини, біодеградабельність. Завданням дослідження [24] було вивчення можливості використання концентрату червоного буряка у якості натурального барвника у шкіряному виробництві. Для цього червоним буряком фарбували шкіряний напівфабрикат, видублений різними дубильними речовинами (сполуки хрому та алюмінію, синтани, таніди тари). З метою отримання різних кольорів та покращення міцності шкіри застосували різні протрави – на базі сульфатів міді, заліза та калій-алюмінієвих галунів. Ефективність фарбування визначали за витратою барвника, кольором шкіри, показниками стійкості до сухого/вологого стирання. Червоні буряки та протрави надавали різні кольорні тони для різних типів дубленої шкіри, найбільш помітну зміну отримали з протравною  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . Зроблено висновок, що концентрат червоних буряків можна використовувати безпосередньо як джерело натурального барвника при фарбуванні шкіри без проведення процесу екстракції.

У дослідженні вчених з Казахстану і Туреччини [25] Краст хромового дублення з бичини фарбували за діючою технологією, використовуючи у дослідних групах замість пігментів рослинні екстракти: шкаралупи волоського горіха (*Juglans regia*), кори дубу (*Quercus cortex*) та лушпиння цибулі (*Allium cepa*). Контрольні групи формували із зразків, оброблених без пігменту та барвників. Ефективність біобарвників визначали вимірюванням кольору на спектрофотометрі Konica Minolta CM 3600d і тестуванням стійкості до сухого і мокрого стирання згідно зі стандартом TS EN ISO 11640 (2001). Результати дослідження були статистично оцінені за допомогою методу Number Cruncher Statistical System. За результатами дослідження встановлено залежність кольору від виду біобарвника, покращення міцності дослідних шкір.

За допомогою простих та ефективних реакцій тіол-енового кліку та амідуювання з натуральної рицинолеїнової кислоти, комерційно доступних тіогліцерину та моноетаноламіну синтезована амідована гідроксильована рицинолеїнова кислота (MRH), яку використали для емульсійного жирування високоякісної шкіри для салонів автомобілів з низьким значенням запотівання [26]. Оскільки після застосування MRH промислові стоки є біорозкладними, це сприятиме створенню чистішого виробництва.

У ряді робіт останніх років відзначаються переваги застосування у рідинному оздобленні поліакрилатів та модифікованих жирів. Однак, є окремі згадки про те, що додублені акриловими полімерами шкіри мають більш низьку інтенсивність кольору та міцність через високу аніонну активність, яка змінює катіонну поверхню шкіри, викликаючи меншу взаємодію фарбуючих і жируючих агентів зі шкірою. За результатами дослідження [27] встановлено, що технологія рідинного оздоблення з використанням акрилового полімеру нового покоління під час додублювання-наповнювання та модифікованих жирів на основі натуральних та синтетичних масел під час жирування дозволяє покращити споживчі та розкрійні властивості готової шкіри, більш раціонально використовувати сировинно-матеріальні ресурси. На це вказують покращення відпрацювання фарбувального розчину на 14,7% та більш рівномірне забарвлення шкіри в дослідній групі в чорний колір, що дозволяє зменшити на чверть витрату барвника, покращити показники якості шкіри для верху взуття з сировини великої рогатої худоби. Досягнутий ефект пояснюється характером розподілу та фіксації хімічних матеріалів у структурі дерми.

Зменшити проблему генерації відходів та забруднення довкілля можна і за допомогою наноматеріалів – крихітні частинки розміром 1–100 нм можуть замінити хімічні реагенти на різних етапах виготовлення шкіри. Метою статті [28] було виконати огляд основ класичного процесу оброблення шкіри і того, як наноматеріали можуть застосовуватися на кожному етапі для отримання більш сталого виробництва. Після всебічного огляду літератури автори визначили шість етапів потенційного застосування наноматеріалів: знезолювання, дублення, додублювання, фарбування, жирування та оздоблення. За допомогою наноксидів, полімерів та металів можна скоротити кількість хімічних продуктів, а також покращити властивості шкіри. Таким чином, можна досягти більш екологічного та ефективного процесу з використанням наноматеріалів для перетворення шкури на готову шкіру.

**II. Очищення стічних вод та перероблення твердих відходів.** Шкіряне виробництво характеризується утворенням величезної кількості стічних вод з високим вмістом органічних та неорганічних речовин, що призводить до повсюдного забруднення води та ґрунту. Мембранні операції під тиском та мембранні біореактори давно зарекомендували себе як ефективний підхід до очищення стічних вод після дублення, спрямований на відновлення сировини, видалення токсичних та шкідливих для довкілля речовин. Такі процеси, своєчасно інтегровані між собою та/або з традиційними фізико-хімічними та біологічними методами оброблення, надають корисні протоколи для очищення глобальних стічних вод зі значними перевагами з точки зору захисту навколишнього середовища, зниження витрат на утилізацію, спрощення процесів очищення, економії води та хімікатів. У статті [29] розглянуто спробу переглянути потенціал та перспективи мембранних технологій у шкіряній промисловості з відповідним застосуванням у підготовчих процесах, дубленні та мокрому оздобленні, а також для очищення глобальних стічних вод.

Дублення, зокрема виробництво хромової шкіри, як і раніше, характеризується неефективним використанням сировини та утворенням сильно забруднених стічних вод і твердих відходів. Частина викидів можна уникнути шляхом впровадження чистих технологій дублення, решту викидів можна очистити. Чисті технології виробництва та технології очищення відходів (води) повинні мати продуману взаємодоповнюваність. Анаеробне очищення стічних вод із вилученням сульфідів, сірки та енергії (біогазу) є наріжним каменем у такій комплексній технології виробництва чистої хромової шкіри [30].

В оглядовій статті [31] описується використання матеріалів на основі крохмалю як інтелектуальних засобів для видалення барвників та важких металів зі стічних вод за допомогою водневих, електростатичних зв'язків та комплексоутворення; підкреслюються їх економічна ефективність, біорозкладність та біосумісність. Обговорюються поточні обмеження та сфери майбутнього розвитку, а саме: необхідність підвищення адсорбційної здатності та масштабування виробництва для промислового застосування матеріалів на основі крохмалю, покращення методів функціоналізації та вивчення нових додатків у системах очищення води.

Зростаюча кількість шкіряного шламу, що утворюється під час оброблення шкури, часто піддається неконтрольованому похованню або відкритому скиду, викидаючи значну кількість шкідливих забруднюючих речовин у повітря, воду та ґрунт. Більш того, шкіряний шлам, як біомаса, можна вважати відновлюваним джерелом енергії для виробництва біоенергії, що може стати життєздатним рішенням для відповідності сучасним екологічним стандартам та прискорення переходу до економіки замкнутого циклу. Тому стійке управління шкіряним шламом за допомогою передових технологій валоризації стає життєво важливим для відповідності цілям сталого розвитку та зменшення несприятливих екологічних, медичних і соціальних наслідків. При цьому важливо розглядати ефективні та цілісні технології валоризації шкіряного шламу на етапах проєктування, впровадження та експлуатації для уникнення будь-яких небезпек для довкілля та здоров'я. Результати огляду літератури [32]

показали, що більша частина роботи у цьому напрямку зосереджена на відновленні хрому, піролізі, анаеробному спільному зброджуванні та затвердінні, у той час як газифікація та виробництво біодизелю або біопалива зі шкіряного шламу залишаються значною мірою недослідженими. Майбутні дослідження повинні бути зосереджені на оптимізації процесу, аналізі ексергії та енергії, а також техніко-економічній оцінці, включаючи ексергоекономічний та ексергоекологічний аналіз, для розуміння здійсненності та екологічних переваг різних технологій валоризації шкіряного шламу, а також розроблення промислових установок валоризації для управління шкіряним шламом більш економічно та екологічно стійким чином.

Неправильне управління твердими відходами на шкіряних заводах є найбільш істотною проблемою навколишнього середовища для досягнення стійкості, особливо в країнах, що розвиваються. Неefективні стратегії управління твердими відходами негативно впливають на навколишнє середовище та здоров'я людей як на самих підприємствах, так і навколо них. Проблема отримання стійкої відновлюваної енергії з твердих відходів шкіри авторами [33] розглядається в ракурсі: а) різних утворюваних твердих відходів і точках їх генерації у шкіряній промисловості; б) піролізу та газифікації твердих відходів шкіри для перетворення на цінні продукти та енергію; в) розгляду хромування твердих відходів шкіри та їхньої зрілості у вигляді рівня готовності технології; г) пропозиції вилучення вторинної сировини в контексті економіки замкнутого циклу, яка може використовуватися в інших промислових процесах. Виробництво біовугілля становить близько 71% від шламу шкірзаводів, що оцінюється з використанням процесу піролізу. Разом з тим, існує прогалина у дослідженнях та одержанні енергії з твердих відходів шкіри. Тому нові дослідження допоможуть розробити ефективні стійкі заходи та стратегії управління твердими відходами шкіряного виробництва.

Дослідження [34] фокусується на повторному використанні дехромованих колагенових волокон, отриманих з хромової стружки, для додублювання-наповнювання шкіри. Визначено вплив умов гідролізу на в'язкість та міцність гелю дехромованих гідролізатів колагену, оцінено ефективність застосування гідролізатів з різною дисперсністю у процесі додублювання шкіри. Результати дослідження мають важливі керівні наслідки для просування внутрішньої кругової економіки та сталого розвитку у шкіряній промисловості.

**Висновки.** На підставі аналізу та систематизації літератури розширено уявлення про сучасні підходи до створення екологічно орієнтованих технологій шкіряного виробництва. Сучасне виробництво натуральної шкіри, яке передбачає перероблення сировини біогенного походження з використанням значної кількості води, електроенергії та хімічних матеріалів, супроводжується утворенням великого обсягу твердих відходів, суттєвим забрудненням стічних вод. Це примушує шкіряну промисловість активно шукати рішення, спрямовані на зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Аналіз літератури відображає зростання досліджень та розробок у цьому напрямку з наголосом на стійку хімію як основу створення чистих технологій та сталого розвитку галузі.

Необхідність економії природних ресурсів розширює застосування натуральних і наноматеріалів на різних етапах шкіряного виробництва. На особливу увагу заслуговує питання створення ферментних препаратів, впровадження яких дозволить зменшити використання або повністю виключити низку екологічно небезпечних матеріалів, що позитивно позначиться на екологічному стані як на самих підприємствах, так і навколо них. Пропонуються більш ефективні технології оброблення шкіри на різних етапах технологічного циклу (особливо підготовчих і дубильних), інноваційні способи очищення стічних вод, більш ефективні прийоми перероблення відходів. Ідеальним підходом до наближення шкіряної промисловості до внутрішньої кругової (циркулярної) економіки є використання відходів власного виробництва як сировини для виготовлення хімікатів (допоміжних засобів) для оброблення шкіри.

## References

1. Chysta tekhnolohiia – shcho tse take, vyznachennia ta kontsepsiia [Clean technology – what is it, definition and concept]. URL: <https://uk.economy-pedia.com/11035969-clean-technology>.
2. Pasquale, R., Pellegrini, T., Serafini, F. (2024). The Future of Leather Production Based on Chemicals Evaluation in Conjunction with Modern Tools for Higher Performing Processes and Lower Environmental Impact. *JALCA*, No. 119 (9), P. 396–404. URL: <https://journals.uc.edu/index.php/JALCA/issue/view/601>.
3. Dixit, S. et al. (2015). Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: a review. *Journal of Cleaner Production*, No. 87, P. 39–49. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.017
4. Thomasset, A., Benayoun, S. (2024). Review: Leather sustainability, an industrial ecology in process. *Journal of Industrial Ecology*, 2024, P. 1–15. DOI:10.1111/jiec.13547.
5. De Almeida, I. M. et al. (2023). Best Environmental Practices in the Leather Sector: a framework for circular economy initiatives based on the views of specialists and researchers. *JSLTC. Moulton: Soc Leather Technol Chemists*, No. 107 (1), P. 19–33. URL: <http://hdl.handle.net/11449/245807>.
6. Zengin, A. et al. (2014). Eco-Friendly Soaking Process Using Tannic Acid as an Alternative Bactericide. *Archives of Environ. Protection*, No. 40 (1), P. 3–12. DOI: 10.2478/aep-2014-0003.
7. Ranjithkumar, A. et al. (2017). Cleaner processing: a sulphide-free approach for depilation of skins. *Environ Sci Pollut Res.*, No. 24 (1), P. 180–188, DOI: 10.1007/s11356-016-7645-6.
8. Durga, J. et al. (2019). Green processing: minimising harmful substances in leather making. *Environ Sci Pollut Res.*, No. 26 (7), P. 6782–6790, DOI: 10.1007/s11356-018-04111-z.
9. Shakilanishi, S., Mrudula, P., Shanthi, C. (2024). Production of dehairing protease by *Bacillus cereus* VITSN04: a model cradle-to-cradle approach for sustainable greener production of leathers. *Environmental technology*, No. 45 (1), P. 180–191, DOI: 10.1080/09593330.2022.2102938.
10. Renganath, R. R., Vimudha, M., Saravanan, P. (2018). Preparation and application of unhairing enzyme using solid wastes from the leather industry – an attempt toward internalization of solid wastes within the leather industry.

## Література

1. Чиста технологія – що це таке, визначення та концепція. URL: <https://uk.economy-pedia.com/11035969-clean-technology>.
2. Pasquale R., Pellegrini T., Serafini F. The Future of Leather Production Based on Chemicals Evaluation in Conjunction with Modern Tools for Higher Performing Processes and Lower Environmental Impact. *JALCA*. 2024. No. 119 (9). P. 396–404. URL: <https://journals.uc.edu/index.php/JALCA/issue/view/601>.
3. Dixit S. et al. Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: a review. *Journal of Cleaner Production*. 2015. No. 87. P. 39–49. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.017.
4. Thomasset A., Benayoun S. Review: Leather sustainability, an industrial ecology in process. *Journal of Industrial Ecology*. 2024. P. 1–15. DOI: 10.1111/jiec.13547.
5. De Almeida I. M. et al. Best Environmental Practices in the Leather Sector: a framework for circular economy initiatives based on the views of specialists and researchers. *JSLTC. Moulton: Soc Leather Technol Chemists*. 2023. No. 107 (1). P. 19–33. URL: <http://hdl.handle.net/11449/245807>.
6. Zengin A. et al. Eco-Friendly Soaking Process Using Tannic Acid as an Alternative Bactericide. *Archives of Environ. Protection*. 2014. No. 40 (1). P. 3–12. DOI: 10.2478/aep-2014-0003.
7. Ranjithkumar A., et al. Cleaner processing: a sulphide-free approach for depilation of skins. *Environ Sci Pollut Res*. 2017. No. 24 (1). P. 180–188. DOI: 1007/s11356-016-7645-6.
8. Durga J. et al. Green processing: minimising harmful substances in leather making. *Environ Sci Pollut Res*. 2019. No. 26 (7). P. 6782–6790. DOI: 10.1007/s11356-018-04111-z.
9. Shakilanishi S., Mrudula P., Shanthi C. Production of dehairing protease by *Bacillus cereus* VITSN04: a model cradle-to-cradle approach for sustainable greener production of leathers. *Environmental technology*. 2024. No. 45 (1). P. 180–191. DOI: 10.1080/09593330.2022.2102938.
10. Renganath R. R., Vimudha M., Saravanan P. Preparation and application of unhairing enzyme using solid wastes from the leather industry – an attempt toward internalization of

- Environ Sci Pollut Res.*, No. 25, P. 2121–2136, DOI: 10.1007/s11356-017-0550-9.
11. Morera, J. M. et al. (2008). Minimization of the environmental impact in the unhairing of bovine hides. *Chemosphere*, No. 72 (11), P. 1681–1686, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.05.023.
12. Kanagaraj, J., Panda, R., Prasanna, R., Prasanna, R. (2023). An efficient dehairing system supported by oxidative-enzymatic auxiliary towards sustainability. *Environ Sci Pollut Res.*, No. 30 (2), P. 43817–43832. DOI: 10.1007/s11356-023-25380-3.
13. Marsal, A., Celma, P. J., Cot, J., Cequier, M. (2000). Supercritical CO<sub>2</sub> extraction as a clean degreasing process in the leather industry. *Journal of Supercritical Fluids*, No. 16 (3), P. 217–223, DOI: 10.1016/S0896-8446(99)00031-5.
14. Sivakumar, V. (2022). Towards environmental protection and process safety in leather processing – A comprehensive analysis and review. *Process Safety and Environmental Protection*, No. 163, P. 703–726, DOI: 10.1016/j.psep.2022.05.062.
15. De Almeida, I. M. et al. (2023). Best Environmental Practices in the Leather Sector: a framework for circular economy initiatives based on the views of specialists and researchers. *JSLTC. Moulton: Soc Leather Technol Chemists*, No. 107 (1), P. 19–33, URL: <http://hdl.handle.net/11449/245807>.
16. Zhang, T., et al. (2013). A Rationalized Leather Process for Wet-end: Pre-tanning-Integrated Post-tanning System. *30th Congress of the International Union of Leather Technologists & Chemists Societies, Proceedings*, Beijing, P. 129–135, URL: [https://www.researchgate.net/publication/289120734\\_A\\_rationalized\\_leather\\_process\\_for\\_wet-end\\_Pre-tanning-integrated\\_post-tanning\\_system](https://www.researchgate.net/publication/289120734_A_rationalized_leather_process_for_wet-end_Pre-tanning-integrated_post-tanning_system).
17. Gao, D. et al. (2023). A green tanning method based on POSS-COONa and zirconium: Achieving cleaner leather production. *Progress in Organic Coatings*, No. 183, Art. 107718, DOI: 10.1016/j.porgcoat.2023.107718.
18. Wu, X. et al. (2020). An eco-friendly tanning process to wet-white leather based on amino acids. *Journal of Cleaner Production*, No. 270, Art. 122399, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122399.
19. Md. Abu Sayid Mia et al. (2024). Eco-friendly Chrome Tanning of Leather using Ultrasound Technique. *solid wastes within the leather industry. Environ Sci Pollut Res.* 2018. No. 25. P. 2121–2136. DOI: 10.1007/s11356-017-0550-9.
11. Morera J. M. et al. Minimization of the environmental impact in the unhairing of bovine hides. *Chemosphere*. 2008. No. 72 (11). P. 1681–1686. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.05.023.
12. Kanagaraj J., Panda R., Prasanna R., Prasanna R. An efficient dehairing system supported by oxidative-enzymatic auxiliary towards sustainability. *Environ Sci Pollut Res.* 2023. No. 30 (2). P. 43817–43832. DOI: 10.1007/s11356-023-25380-3.
13. Marsal A., Celma P. J., Cot J., Cequier M. Supercritical CO<sub>2</sub> extraction as a clean degreasing process in the leather industry. *Journal of Supercritical Fluids*. 2000. No. 16 (3). P. 217–223. DOI: 10.1016/S0896-8446(99)00031-5.
14. Sivakumar V. Towards environmental protection and process safety in leather processing – A comprehensive analysis and review. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. No. 163. P. 703–726. DOI: 10.1016/j.psep.2022.05.062.
15. De Almeida I. M. et al. Best Environmental Practices in the Leather Sector: a framework for circular economy initiatives based on the views of specialists and researchers. *JSLTC. Moulton: Soc Leather Technol Chemists*. 2023. No. 107 (1). P. 19–33. URL: <http://hdl.handle.net/11449/245807>.
16. Zhang T. et al. A Rationalized Leather Process for Wet-end: Pre-tanning-Integrated Post-tanning System. *30th Congress of the International Union of Leather Technologists & Chemists Societies, Proceedings*. Beijing, 2013. P. 129–135. URL: [https://www.researchgate.net/publication/289120734\\_A\\_rationalized\\_leather\\_process\\_for\\_wet-end\\_Pre-tanning-integrated\\_post-tanning\\_system](https://www.researchgate.net/publication/289120734_A_rationalized_leather_process_for_wet-end_Pre-tanning-integrated_post-tanning_system).
17. Gao D. et al. A green tanning method based on POSS-COONa and zirconium: Achieving cleaner leather production. *Progress in Organic Coatings*. 2023. No. 183. Art. 107718. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2023.107718.
18. Wu X. et al. An eco-friendly tanning process to wet-white leather based on amino acids. *Journal of Cleaner Production*. 2020. No. 270. Art. 122399. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122399.
19. Md. Abu Sayid Mia et al. Eco-friendly Chrome Tanning of Leather using Ultrasound



- [https://www.researchgate.net/publication/11326092\\_Reducing\\_environmental\\_emissions\\_in\\_tanneries](https://www.researchgate.net/publication/11326092_Reducing_environmental_emissions_in_tanneries).
31. Kiran, M. et al. (2024). Starch-based bio-membrane for water purification, biomedical waste, and environmental remediation. *International Journal of Biological Macromolecules*, No. 282, Art. 137033, DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137033.
32. Moktadir, M. A., Ren, J., Zhou, J. (2023). A systematic review on tannery sludge to energy route: Current practices, impacts, strategies, and future directions. *Science of the Total Environment*, No. 901, Art. 166244, DOI: 10.1016/j.scitotenv.901.166244.
33. Mahmood, A. et al. (2023). A renewable and sustainable framework for clean fuel towards circular economy for solid waste generation in leather tanneries. *Fuel*, No. 351, Art. 128962, DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128962.
34. Li, M. et al. (2024). An Effective and Harmless Recycling Technology for Hazardous Chrome-Tanned Leather Wastes: Reutilization of dechromed collagen fibers as filler in leather making processing. *JSLTC. Moulton: Soc Leather Technol Chemists*, No. 108 (2), P. 67–77. URL: <https://www.sltc.org/sltc-journals/jsltc0224.html>.
2002. No. 37 (4). P. 737–743. URL: [https://www.researchgate.net/publication/11326092\\_Reducing\\_environmental\\_emissions\\_in\\_tanneries](https://www.researchgate.net/publication/11326092_Reducing_environmental_emissions_in_tanneries).
31. Kiran M. et al. Starch-based bio-membrane for water purification, biomedical waste, and environmental remediation. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. No. 282. Art. 137033. DOI: 10.34314/jalca.v119i1.8289.
32. Moktadir M. A., Ren J., Zhou J. A systematic review on tannery sludge to energy route: Current practices, impacts, strategies, and future directions. *Science of the Total Environment*. 2023. No. 901. Art. 166244. DOI: 10.1016/j.scitotenv.901.166244.
33. Mahmood A. et al. A renewable and sustainable framework for clean fuel towards circular economy for solid waste generation in leather tanneries. *Fuel*. 2023. No. 351. Art. 128962. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128962.
34. Li M. et al. An Effective and Harmless Recycling Technology for Hazardous Chrome-Tanned Leather Wastes: Reutilization of dechromed collagen fibers as filler in leather making processing. *JSLTC. Moulton: Soc Leather Technol Chemists*. 2024. No. 108 (2). P. 67–77. URL: <https://www.sltc.org/sltc-journals/jsltc0224.html>.

**SKYBA MYKOLA**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Department of Machines and Devices, Electromechanical  
and Energy Systems, Khmelnytskyi National University, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-0217-9633>  
Scopus Author ID: 57204934613  
E-mail: mykolaskybaxnu@gmail.com

**SKYBA M. Y.**

Khmelnytskyi National University, Ukraine

**CLEAN TECHNOLOGIES IN TANNERY**

**Purpose.** To summarize and systematize the information provided in the scientific and technical literature on the use of clean technologies in the production of genuine leather, which do not have or reduce the permanent negative impact on the environment.

**Methodology.** To ensure a systematic approach to obtaining, analysing and interpreting the results, the methods of research, analysis, coordination, generalization and systematization were used.

**Findings.** Based on the analysis of scientific and technical literature of recent years, the essence and significance of resource-saving and environmentally friendly technologies for the sustainable development of the industry are revealed. Modern production of genuine leather involves the processing of natural raw materials using large amounts of water, electricity and chemicals. The latter leads to the formation of a large volume of solid waste, significant pollution of industrial wastewater and forces us to actively seek ways to reduce the negative impact of industrial activities of industry enterprises on the environment. The analysis of the literature reflects the growth of research and development in this area with an emphasis on sustainable chemistry as the basis for creating clean

technologies and sustainable development of the industry. The need to save natural resources expands the use of natural and nanomaterials at different stages of tannery. Particular attention should be paid to the creation of enzyme preparations, the introduction of which will reduce the use or completely eliminate a number of environmentally hazardous materials and positively affect the environmental state, both at the enterprises themselves and around them. More efficient technologies for processing skins at different stages of the technological cycle, innovative methods of wastewater treatment, more efficient waste recycling techniques are proposed. The ideal approach to moving the industry closer to a circular economy is to use waste from its own production to tannery.

**Originality.** Information has been generalized and systematized on approaches to the use of clean technologies at all stages of the production of genuine leather - from raw materials in the form of animal skin to a wide range of finished products - aimed at adhering to the principles of resource conservation and reducing the harmful environmental impact on the environment both at an individual enterprise and in the industry as a whole.

**Practical value.** The results of studying and organizing theoretical and practical achievements in the leather production of clean technologies will contribute not only to the expansion of knowledge about improving the methods of manufacturing natural leather in the direction of reducing environmental pollution due to the production activities of industry enterprises, but also to the advancement of scientific, technical and technological development of the industry to a higher level, namely the creation of circular technologies.

**Keywords:** tannery; clean technology; raw materials; leather; chemicals; wastewater; waste; environment.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.5.12>

УДК 666.76,  
661.174

<sup>1</sup>ТАРАН Н. А., <sup>1</sup>ШОЛОГОН В. І., <sup>2</sup>ВАХІТОВ Р. А.,  
<sup>1</sup>РАЄНКО Г. Ф., <sup>1</sup>КАЛАФАТ К. В., <sup>1,2</sup>БЕССАРАБОВ В. І.

<sup>1</sup> Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН  
України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

## РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБІВ МОБІЛЬНОГО ВОГНЕЗАХИСТУ – РУЛОННИХ ПРОТИПОЖЕЖНИХ МАТЕРІАЛІВ. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

**Мета.** Визначення сучасних тенденцій вдосконалення вогнезахисних рулонних матеріалів, спрямованого на підвищення їх вогнестійкості, механічної міцності та екологічної безпеки, для пошуку інноваційних технічних рішень з розроблення засобів мобільного вогнезахисту.

**Методика.** Використано методи літературно-системного та критичного аналізу, метод узагальнення результатів з різних джерел для створення цілісної картини стану наукової проблеми, метод порівняльного аналізу різних підходів, що використовуються в дослідженнях з теми огляду.

**Результати.** Показано, що одним із актуальних напрямків розвитку протипожежної галузі є створення та організація мобільного вогнезахисту, який може бути використаний для підвищення пожежної безпеки об'єктів оборонного призначення, а саме місць зберігання боєприпасів у польових умовах. Розглянуто наукові праці та практичні втілення щодо різних видів вогнезахисних рулонних матеріалів - вогнезахисних ковдр, гнучких виробів з інтумесцентним покриттям чи термостійким наповненням тощо. Обґрунтовано, що армування вогнезахисних рулонних покриттів є важливим процесом, який сприяє покращенню механічних властивостей та підвищенню ефективності засобу вогнезахисту. Проаналізовано існуючі способи отримання волокон і текстильних матеріалів зі зниженою горючістю, які використовуються під час виготовлення вогнезахисних рулонних матеріалів. Показано, що ефективним засобом, який поєднує найкращі якості конструктивного та інтумесцентного вогнезахисту, є використання вогнезахисних матеріалів, що спучуються, на гнучкій основі. Проаналізовано патентну інформацію, рецептури та технології виготовлення засобів мобільного вогнезахисту інтумесцентного типу.

**Наукова новизна.** Вперше на основі масиву літературних даних та патентного пошуку проведено аналіз та узагальнення щодо практичного значення, технологічних аспектів виготовлення, показників вогнезахисної ефективності гнучких протипожежних засобів, як складової мобільного вогнезахисту у польових умовах для забезпечення тривалої експлуатації без втрати захисних властивостей.

**Практична значимість.** Надано практичні рекомендації щодо складу, впливу інноваційних вогнезахисних добавок та наноматеріалів, технології виготовлення вогнезахисних рулонних матеріалів, які можуть бути застосовані для протипожежного захисту оборонних, будівельних та промислових об'єктів.

**Ключові слова:** конструктивний вогнезахист; рулонні протипожежні матеріали; вогнезахисні ковдри; інтумесцентні матеріали.

**Вступ.** Забезпечення захисту від вогню є однією з ключових задач у сфері протипожежної безпеки. З розвитком технологічного прогресу небезпека пожеж зростає практично у тій самій прогресії. І однією з найважливіших складових у системі заходів щодо захисту від пожеж є заходи із забезпечення пожежної безпеки [1]. В умовах російсько-української війни значення вогнезахисту стає вкрай важливим як для військових, так і для цивільного населення. При цьому одним із актуальних напрямків розвитку протипожежної галузі є організація мобільного вогнезахисту, який характеризується швидкістю монтажу та технологічністю застосування у польових умовах [2, 3].

В умовах війни безпека зберігання боєприпасів має критичне значення. Однією з найважливіших загроз є можливість пожежі, яка може призвести до детонації боєприпасів і

серйозних наслідків як для персоналу, так і для інфраструктури. Тому розробка ефективних вогнезахисних бар'єрних матеріалів для зберігання боєприпасів є актуальним науково-технічним завданням. Такі матеріали можуть значно знизити ризик вибухів та зберегти людські життя, військову інфраструктуру, стратегічні ресурси [4]. В польових умовах боєприпаси часто зберігаються в тимчасових сховищах. Використання вогнезахисних рулонних матеріалів дозволяє забезпечити вогнезахист місць зберігання вибухової зброї від руйнівної дії пожежі [4, 5].

**Метою** цього огляду літератури є визначення сучасних тенденцій вдосконалення вогнезахисних рулонних матеріалів, спрямованих на підвищення їх вогнестійкості, механічної міцності та екологічної безпеки, для пошуку інноваційних технічних рішень з розроблення засобів мобільного вогнезахисту.

**Виклад основного дослідження.**

**Рулонні вогнезахисні матеріали загального призначення.**

Методи вогнезахисту поділяють на дві великі групи:

- активні методи вогнезахисту – засновані на застосуванні систем автоматичної пожежної сигналізації та пожежогашіння, засобів протидимного захисту, а також пристроїв, що забезпечують обмеження розповсюдження пожежі;

- пасивні методи вогнезахисту – засновані на використанні матеріалів, які запобігають займанню та перешкоджають поширенню вогню і підвищують вогнестійкість будівельних споруд, інженерних систем та конструкцій з деревини, пластмас, бетону та залізобетону [1, 6].

Сучасні методи пасивного вогнезахисту можна умовно розділити на два напрями: тонкошарові вогнезахисні покриття та конструктивний вогнезахист.

Тонкошаровий вогнезахист полягає в застосуванні фарб, лаків і складів, просочень для деревини і тканин, коли матеріал наноситься на поверхню, що захищається тонким шаром та зберігає конфігурацію конструкції. Вогнезахисна дія таких покриттів заснована на тому, що при певній температурі відбувається початок хімічних реакцій і фізичних процесів, що призводять до утворення спінених теплоізолюючих шарів (коксу або твердіючого плава) та/або виділення продуктів, флегматизуючих та інгібуючих процес горіння. Внаслідок чого при впливі джерел полум'я та тепла запобігається займання, знижується інтенсивність поширення полум'я, збільшується межа вогнестійкості конструкцій [1, 7–11].

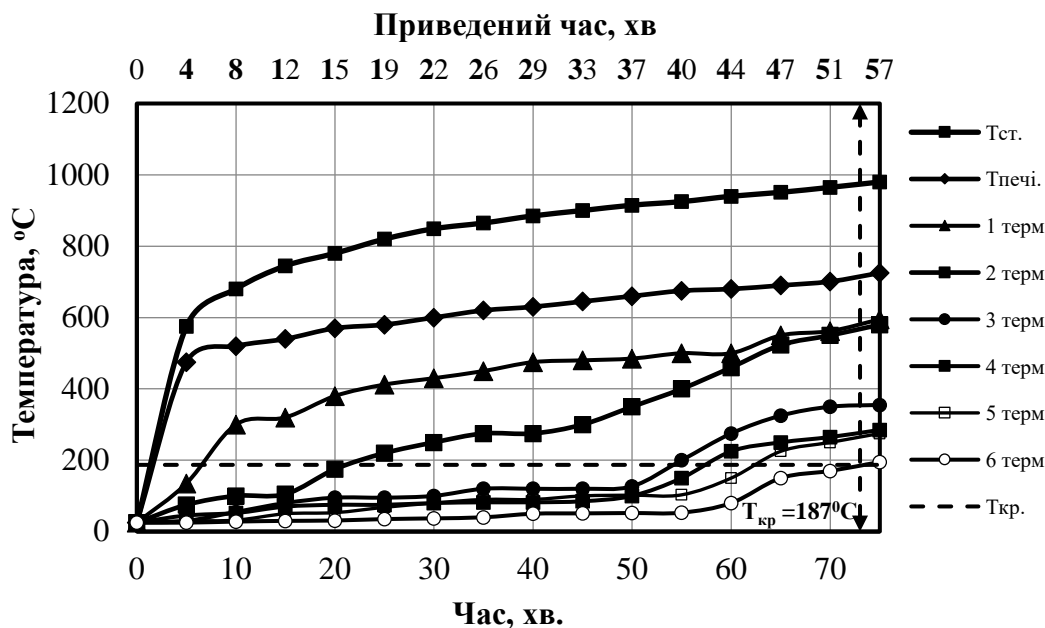
До конструктивного вогнезахисту відносяться штукатурки, облицювання плитними, рулонними та іншими вогнезахисними матеріалами, у тому числі на каркасі, з повітряними прошарками, а також комбінація даних матеріалів, у тому числі з тонкошаровими покриттями, що спучуються. Широкого застосування набули гіпсокартонні листи, магнезитові, гіпсоволокнисті та вермикулітові плити, композитні панелі, плити з базальтовими волокнами тощо [12–15].

Так, наприклад, в роботі [16] розглянуто зразки багатшарових огорожувальних конструкцій, виготовлених з профільованого металу з наповнювачем із пінополістиролу товщиною 100 мм та двох додаткових шарів із гіпсокартону товщиною по 12,5 мм (марка СПГ). Проведено експериментальні дослідження межі вогнестійкості дослідних конструкцій в печі для теплофізичних випробувань малогабаритних фрагментів будівель.

На рис. 1 графічно відображено розподіл температур в зразку СПГ під час проведення вогневих випробувань.

Показано [16], що межа вогнестійкості за ознакою втрати теплоізолюючої здатності дослідного зразка настала орієнтовно на 56 хв проведення експерименту при значенні критичної температури 187 °С. Таким чином, автори зробили висновок, що огорожувальні конструкції типу СПГ можна використовувати в якості зовнішніх та внутрішніх теплоізолюючих ненесучих стін [17].

Як конструктивні засоби вогнезахисту застосовуються рулонні (що згинаються) матеріали у зв'язку з низкою унікальних властивостей: сухий монтаж, висока продуктивність монтажу, оскільки конструкція «обертається», а не обкладається плитами. Рулонні вогнезахисні матеріали знаходять застосування в цивільному та промисловому будівництві (двері, перегородки, повітропроводи), в машинобудуванні (суднобудуванні, літакобудуванні), ізоляція промислового обладнання, транспортних засобів [18–22].



Легенда: 1 – 6 – криві показів термопар,  $T_n$  – середнє арифметичне значення температури за показами двох термопар в печі;  $T_{ст}$  – крива стандартного температурного режиму;  $T_{кр}$  – критична температура на зовнішній (необігрівній) поверхні

Рис. 1. Розподіл температур по товщині зразка марки СПГ під час випробування [16]

У роботі [18] описано гнучку вогнестійку теплоізоляцію, що використовується в літакобудуванні, в якій між шарами волокнистих матів або пінної ізоляції додатково розміщують високотермостійкий матеріал у вигляді листових шарів, після чого отриману конструкцію поміщують в оболонку. Термостійкі листові шари містять пластинчастий мінерал на зразок вермикуліту, який покриває з обох боків тонкі листи по типу паперу з органічних волокон, тонкі мати зі скловолокон або тканину. Як зовнішню оболонку теплоізоляції використовують поліімідну плівку. Час пропалювання такого матеріалу, що визначається за стандартом США ASTM E-119 [19], залежно від конкретного матеріалу всіх складових компонентів, збільшується з 2–3 до 5–10 хв, завдяки наявності проміжних шарів.

#### **Вогнезахисні рулонні матеріали з армованою структурою.**

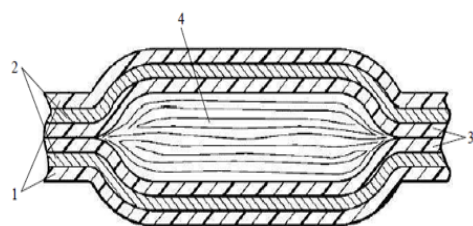
Армування вогнезахисних рулонних покриттів являє собою важливий процес, що сприяє покращенню їх механічних властивостей та підвищенню ефективності вогнезахисту. Воно включає введення армуючих матеріалів, таких як скловолокно, базальтові волокна, металевий дріт, вуглецеві волокна або синтетичні полімери, у структуру покриття. Основні функції армування:

- зміцнення структури покриття: армуючі матеріали підвищують механічну міцність покриття, що робить його більш стійким до розривів та механічних пошкоджень;
- підвищення вогнестійкості: завдяки армуючим волокнам, покриття краще витримує високі температури, уповільнює процеси горіння та утворення тріщин;

- збереження цілісності при нагріванні: армовані покриття краще зберігають свою форму і структурну цілісність при впливі високих температур, запобігаючи розшаруванню та відшаруванню;

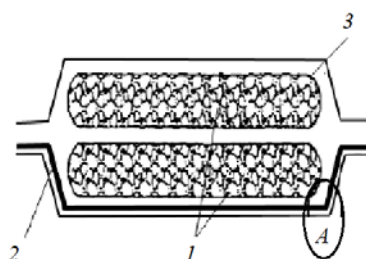
- поліпшення адгезії: армуючі матеріали сприяють кращому закріпленню покриття до поверхні основного матеріалу [20–22].

У патенті [23] запропоновано гнучку вогнетеплозахисну систему, що містить композиційний ламінат, який складається з полімерного вологозахисного шару 1 товщиною від 6 до 25 мкм, неорганічного пластинчастого шару 2 товщиною від 7 до 76 мкм і термопластичної плівки 3 завтовшки >25 мкм; цей композиційний ламінат вкриває внутрішній мат 4 (рис. 2 (а)).



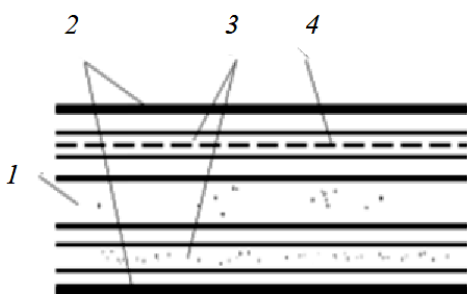
(а)

Легенда: 1 – вологозахисний шар;  
2 – пластинчастий шар, 3 – термопластична плівка;  
4 – внутрішній мат [23]



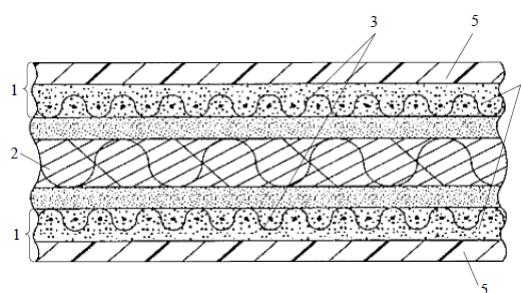
(б)

Легенда: 1 – скломат; 2 – ламінат; 3 – плівка [24]



Фрагмент А (в)

Легенда: 1 – вогнезахисний папір; 2 – плівка;  
3 – адгезійний шар; 4 – зміцнювальна сітка [24]



(г)

Легенда: 1 – шар, зміцнений сіткою;  
2 – керамічний волокнистий матеріал; 3 – шар сітки;  
4 – незаймисте сполучне для склеювання шарів;  
5 – облицювальний шар [25]

Рис. 2. Вогнетеплозахисні системи

Вологозахисний шар 1 перешкоджає проникненню вологи у волокнистий мат і забезпечує механічну міцність і жорсткість ламінату. Оптимальними матеріалами цього шару є фторполімери або полііміди. Зовнішня поверхня вологозахисного шару, що контактує з пластинчастим шаром може бути покрита політетрафторетиленом (тефлоном) або металізована. Неорганічний пластинчастий шар 2 призначений для захисту від полум'я і гарячих газів і може являти собою пластинки монтморилоніту, слюди, вермикуліту, тальку або їх комбінації. Переважним є вермикуліт, решта – оксиди К, Са, Ті, Сr, Na, Mn або Ва. Пластинки можуть бути нанесені на сітку з натурального або неорганічного волокна (скло, бавовна, нейлон). Термопластична плівка 3 має бути здатна до розм'якшення, достатнього, щоб герметично з'єднатися під час нагрівання без розплавлення. Це можуть бути такі матеріали як полікетони, полііміди, полісульфони, фторполімери. Як внутрішній мат 4 використовують органічний або неорганічний матеріал, що має час затухання не більш як 10 с і довжину пропалу не більш як 102 мм. Наприклад пінний поліімідний матеріал або

волокнистий мат, що містить скляні, арамідні, керамічні, кварцові, карбідокремнієві, вуглецеві та інші волокна [23].

У США було запатентовано вогнезахисний папір і протипожежний ламінат з його використанням, призначений для оболонки скломату вогнетеплоізоляційної системи. На рис. 2 (б) представлено поперечний розріз вогнестійкої теплоізоляційної системи, що містить два шари скломатів 1, зовнішній вогнестійкий ламінат 2, що протистоїть впливу полум'я, і внутрішню плівку 3, яка також може бути шаруватою [24]. Рис. 2 (в) демонструє збільшене зображення плівкового ламінату (фрагмент А – див. рис. 2 (б)), що має необхідні протипожежні властивості. Будова вогнестійкого ламінату: вогнезахисний папір 1 укладений між шарами плівки 2 за допомогою адгезійного шару 3. Шар зміцнювальної сітки 4 може бути виконаний зі скловолкна, нейлону або поліестеру. Плівка 2 обрана з групи, що містить поліефіри, полііміди, поліефіркетони, полівінілфториди тощо.

Адгезійний шар для приклеювання плівки до вогнезахисного паперу може бути на основі поліефіру або полівінілфториду з додаванням антипіренових добавок, таких як сполуки сурми, гідратні сполуки оксиду алюмінію, борати, карбонати, фосфати, сульфати, органічні галогеніди та ін. Вогнезахисний папір містить лужноземельні силікатні волокна, рубане скловолокно, органічні зміцнювальні волокна, органічне зв'язуюче та неорганічний наповнювач, такий як бентоніт, гекторит, каолініт та інші види глин. Випробування показали, що такий вогнезахисний ламінат задовольняє вимогам пожежної безпеки, маючи при цьому низьку щільність і достатню вологостійкість [19, 24].

У роботі [25] описано гнучкий вогнестійкий ламінат, що складається з волокнистого теплоізоляційного пакета та гнучкого шаруватого листового матеріалу (рис. 2 (г)), який відповідає вимогам щодо займистості, поширення полум'я та пропалу.

Гнучкий ламінат містить три шари: два шари 1 зміцнені сіткою полімерні матеріали зі сполучною речовиною, між ними керамічний волокнистий матеріал 2. Шар 1 містить полімерний матеріал, який має зберігати стабільність до температури 350 °С. Шаруватий матеріал складається також з сітки 3, яка плетена з поліефіру, нейлону або скловолкна, що підвищує стійкість до розриву. Сітка може бути приклеєна до полімерного матеріалу за допомогою негорючого зв'язуючого 4. Облицювальний шар ламінату 5 складається з полімерного матеріалу тієї ж групи, що і матеріал першого шару.

Другий шар ламінату 2 містить неметалеві волокна, переважно у вигляді тканини або паперу з високоплавких волокон. Волокна не повинні плавитися, горіти або розкладатися за температур щонайменше 250 °С, переважно – до 550 °С. Використовуються скляні, арамідні, кристалічні керамічні волокна, а також волокна з нітриду і карбиду кремнію, вуглецю і поліакрилонітрилу. Переважно використовувати алюмосилікатні, алюмоборосилікатні та волокна оксиду алюмінію як у вигляді тканини, так і у вигляді нетканого матеріалу з короткого волокна. Крім того, другий шар ламінату 2 має покриття з оксиду металу для зміцнення. Покриття на всій поверхні другого шару або на її частині нанесено впорядковано або хаотично. Як правило, таке покриття наносять принтовим методом [25].

Останнім часом з'явилися матеріали, що поєднують властивості конструктивного вогнезахисту та інтумесцентного захисту, коли при вогневому впливі утворюється пінококс з низькою теплопровідністю, що захищає поверхню об'єкта захисту [26, 27]. Утворення пінококсу відбувається у всіх трьох вимірах (верх, вниз і вздовж поверхні) – "3-dimension". Даний вид вогнезахисту має низьку перевагу перед раніше відомими засобами вогнезахисту:

- можливість проектування вогнезахисту легких сталевих тонкостінних конструкцій за рахунок малої ваги та об'єму;
- сумісність з усіма раніше нанесеними вогнезахисними або антикорозійними покриттями на сталеві конструкції, оскільки сітка просто безконтактно обгортається навколо поверхні конструкції;

- відсутність вимог до спеціальної підготовки поверхні, що захищається (грунтування, знепилування та знежирення) перед монтажем; вимоги висуваються виключно до антикорозійних робіт;

- монтаж, експлуатація та ремонт при температурах від  $-40^{\circ}$  до  $+50^{\circ}$  С, вологості 100%; за наявності опадів та поривів вітру, що допускають роботу згідно з вимогами техніки безпеки праці та рівнем кваліфікації персоналу;

- простота періодичного або контрольного огляду відповідальних вузлів сталевих конструкцій з подальшим відновленням вогнезахисного покриття;

- широкий діапазон виконання у насичених кольорах для вирішення архітектурно-естетичних завдань [26–28].

Протягом тривалого часу і досить широко для армування вогнезахисних складів використовувалися сітки з металевого дроту [26, 27]. У роботі [28] досліджено можливість створення вогнезахисних екранів на основі металевих сіток, оброблених спіненим складом. Використовувати такі облаштування рекомендується для захисту технологічного устаткування, що зумовлено низкою цінних переваг за нормальних умов: екран не перешкоджає тепло- і повітрообміну, апарат, що захищається, доступний для візуального контролю. Під час пожежі, що супроводжується виділенням теплових потоків, відбувається спінювання покриття і заповнення вільного сіткового простору пінококсом. Конструкція, що трансформувалася таким чином, утворює вогнестійкий бар'єр, що перешкоджає поширенню конвективних потоків і поглинає теплове випромінювання. Так, показано, що вогнезахисна ефективність сіткових пристроїв залежить від потужності та часу впливу теплового потоку. Мінімальна потужність, за якої відбувається спінювання, становила  $3 \text{ кВт/м}^2$ ; повне перекриття комірок відбувається за теплового потоку  $15 \text{ кВт/м}^2$ . Показано, що сіткові конструкції можуть бути ефективним засобом обмеження розповсюдження і гасіння пожежі та бути основою для створення конструкцій, що мають високу межу вогнестійкості (до 1,5 год.), завдяки застосуванню комбінованого вогнезахисту: шару спіненого покриття, армованого металевими сітками [28].

У патенті [29] описано рулонний інтумесцентний матеріал. Гнучка сітка з багатьма пасмами, які утворюють ряд отворів; покриття, що спучується, нанесене на гнучку сітку. Покриття в якості інгредієнтів містить графіт, що спінюється, і носій на основі полімеру. Сітка має такий розмір, щоб покриття, що спучується, дозволяло повітряному потоку проходити через гнучку сітку до тих пір, поки матеріал не буде піддаватися впливу температур, рівних або перевищуючих температуру активації. Після чого покриття, що спучується, набухає, герметизуючи отвори і запобігаючи проходженню повітря через гнучку сітку з дротяної тканини. В одному з прикладів описано формулу: акриловий сополімер (35–56 мас. %), поліфосфат амонію (3–21 мас. %), інтеркальований графіт (3–21 мас. %), діоксид кремнію ( $< 1$  мас. %) та дротяна сітка (30–49 мас. %) [29].

У винаході [30] представлено рішення, що описує вогнезахисний екран, який складається з металеві сітки, пофарбованої покриттям, що спінюється від теплового впливу. Розмір сіткових комірок, діаметр дроту, товщина покриття та кратність спінювання фарби повинні забезпечувати повне перекриття комірок сітки під час теплового впливу [30].

Авторами [26] було розроблено вогнезахисний конструктивний інтумесцентний матеріал, який можна постачати в рулонах, що складається з еластичної полімерної композиції на основі морозостійких і маслобензостійких синтетичних каучуків, інтеркальованого графіту та інших нерозчинних у воді компонентів, нанесених на армуючу сітку з композиції мінераловатних або вуглепластикових волокон. Вогнезахисна сітка обертається навколо виробу (конструкції) в один і більше шарів. Максимальну температуру експлуатації визначено як не більше  $90^{\circ}$  С, оскільки процес утворення пінококсу починається в інтервалі  $180$ – $220^{\circ}$  С. За час проведення випробувань у вогневій камері печі дослідних зразків сталеві двотаврової

балки з вогнезахисною сіткою зафіксовано такі характерні особливості їхньої поведінки. На 5–8 хв починається термічне розширення вогнезахисного покриття, нанесеного на сітку, на 45–50 хв спостерігається побіління спученого шару покриття. На 64 хв випробування дослідні зразки перейшли в граничний стан (досягнення швидкості наростання деформації – понад 0,33 см/хв), що характеризується обваленням дослідних зразків. Матеріал може використовуватися для зниження пожежної небезпеки кабельних виробів і підвищення меж вогнестійкості будівельних конструкцій.

Таким чином, ефективним засобом, що поєднує найкращі якості конструктивного та інтумесцентного вогнезахисту, є використання вогнезахисних матеріалів, що спучуються, на гнучкій основі [31–36].

#### **Способи отримання волокон і текстильних матеріалів зі зниженою горючістю.**

При створенні рулонних вогнезахисних матеріалів використовують різні волокна і текстильні матеріали. Відомо кілька способів отримання волокон і текстильних матеріалів зі зниженою горючістю:

- використання високотермостійких волокноутворюючих органічних полімерів [37];
- використання неорганічних волокон [37, 38];
- модифікація волокноутворюючого полімеру на стадії його синтезу [37, 39];
- модифікація волокна на стадії його формування шляхом використання стабілізаторів і сповільнювачів горіння реакційного типу [40, 41, 42];
- поверхнева або об'ємна обробка волокон, тканин або готових виробів [43, 44];
- хімічна модифікація волокон вогнезахисними засобами з утворенням ковалентних зв'язків між сповільнювачем горіння і макромолекулою волокноутворюючого полімеру [45, 46].

Найпоширенішим способом вогнезахисту тканин є поверхнева обробка або просочення із застосуванням сповільнювачів горіння реакційного типу [47, 48]. Обробка вогнезахисними речовинами текстильних матеріалів забезпечує зниження пожежної небезпеки волокон, ниток, тканин, нетканих матеріалів і виробів з них [49–51]. Ці засоби обмежують поширення полум'я поверхнею, знижують димоутворювальну здатність, токсичність продуктів терморозкладання і тепловиділення.

Засоби вогнезахисту для поверхневої або об'ємної обробки текстильних матеріалів поділяються на дві групи. До першої групи належать вогнезахисні складки, що являють собою різні комбінації бури і борної кислоти, діамонійфосфати та інші неорганічні сполуки. Цей клас сполук знаходить застосування для обробки целюлозних матеріалів. [44, 52]. До другої групи належать вогнезахисні складки, що утворюють на поверхні текстильного матеріалу нерозчинні сполуки. До сполук, які найчастіше застосовують у цьому разі, належать фосфор-, фосфоразот- і фосфоргалогеновмісні сполуки [53].

Прикладом модифікації волокна на стадії його формування шляхом використання сповільнювачів горіння є робота Vaddam зі співавторами [54]. Як добавки в розчині полістиролу були використані борна кислота і нанорозмірний діоксид кремнію. Тканини, створені із застосуванням нанодобавок мають високий вогнестійкий ефект, відмінну довговічність та стабільність, проте їхня висока вартість ускладнює застосування таких матеріалів у промислових масштабах [41, 42, 54].

Широко використовуються [55, 56] технології модифікації поверхні тканин, які включають розпилення, занурення, золь-гель метод та хімічну графт-сополімеризацію [57–61]. Так, технологія розпилення є простою, ефективною і недорогою [55, 56]. За допомогою технології розпилення дисперсія вогнестійких речовин розпилюється на поверхні підкладки а після висихання та витримки формується покриття з однорідною товщиною. У дослідженнях Guo зі співавторами [62] використовували двоетапний метод розпилення для нанесення вогнестійкого шару, що складався з композиту алкіламоній, функціоналізований

силсесквіоксаном (A-POSS) / фітинова кислота (PA) та гідрофобного шару, що складався з діоксиду титану та полідиметилсилоксану (PDMS), на бавовняну тканину. Модифікована бавовняна тканина виявила високу термічну стабільність, відмінну вогнестійкість, гідрофобність та високу механічну стабільність. A. Vishwakarma зі співавторами [63] розробили багатофункціональну бавовняну тканину за допомогою двоетапного методу розпилення «шар за шаром», в якому внутрішній шар забезпечує вогнестійкість, що складається з хітозану та функціоналізованої фітинової кислоти, а зовнішній шар, що складається з композиту PDMS-ZnO, який надає тканині гідрофобність. Така тканина має хорошу вогнестійкість і гідрофобність. Проте складний багатоетапний процес розпилення призводить до збільшення промислових витрат, а високий вміст вогнестійких речовин впливає на гнучкість і довговічність тканини.

Подібних недоліків намагалися уникнути автори [53], запропонувавши ефективний метод створення вогнестійкого тканинного матеріалу. У цьому дослідженні композитне покриття, що складається з фторованого PDMS, продуктів згоряння силіконового каучуку (в основному  $\text{SiO}_2$ ) і поліфосфату амонію (APP) (APP/ $\text{SiO}_2$ /фторований PDMS (F-ASP)), було нанесено розпиленням на поверхню тканини поліетилентерефталату (PET). Аналогічним чином було отримано тканину з нефторованим PDMS (APP/ $\text{SiO}_2$ /PDMS (ASP)). На рис. 3 представлені криві TG і DTG для необробленої PET тканини та з покриттям ASP і F-ASP в атмосфері повітря. Як для оригінальної, так і для покритих PET-тканин притаманні два етапи термічної окислювальної деградації.

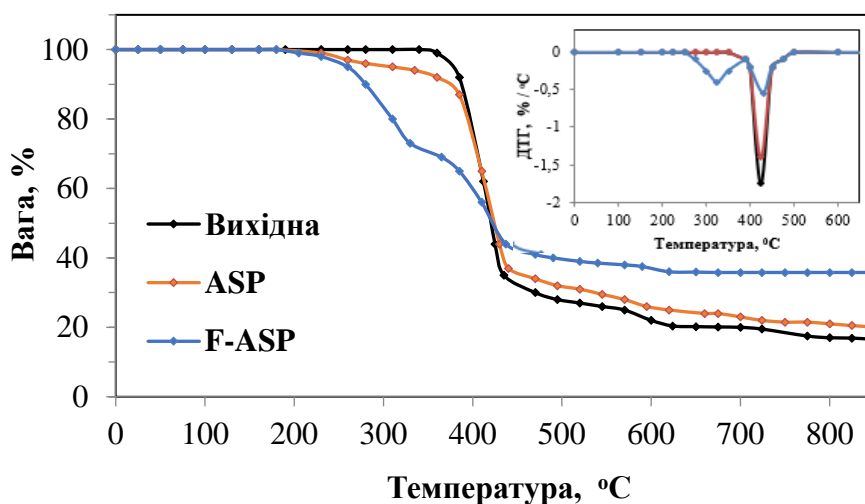


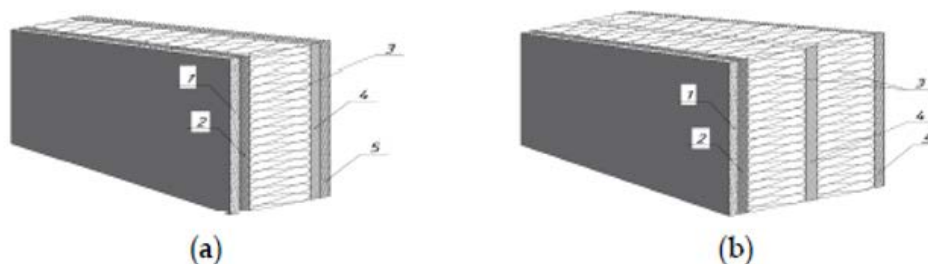
Рис. 3. Криві ТГ і ДТГ PET тканин з покриттям ASP і F-ASP [64]

Перший етап спостерігається в діапазоні температур від 320 °С до 480 °С, що відповідає термічній деградації ланцюга PET на дрібні фрагменти. Слід зауважити, що початкова температура розкладання тканини з покриттям ASP і тканини з покриттям F-ASP знизилася до 255,3 °С і 229,3 °С відповідно порівняно з вихідною тканиною (379,2 °С), що в основному пояснюється раннім розкладанням APP. Після нагрівання APP виділяє  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$  та інші гази, які блокують проникнення кисню на поверхню матеріалу. У той же час, після зневоднення під дією теплової енергії APP генерує поліфосфорну кислоту та поліметафосфорну кислоту, що сприяє дегідратації поверхні з утворенням карбідів. Крім того, утворені нелеткі оксиди фосфору та поліфосфорна кислота покривають поверхню зразка. Завдяки наявності зв'язків C-F PDMS має вищу термічну стабільність ніж оригінальний PDMS. Це може певною мірою запобігти виходу утворених карбідів з гарячим повітрям і покращити стабільність вуглецевого шару [64].

Другий етап спостерігається в діапазоні температур від 490 до 600 °С і пов'язаний з утворенням летких продуктів дрібними фрагментами PET. Крім того, вуглецевий залишок вихідної тканини при 900 °С становить лише 15,7% мас., для тканини з покриттям ASP – 17,8% мас., а для тканини з покриттям F-ASP – 35,1 мас.%. Це підтверджує, що фторований PDMS у композитному покритті сприяє утворенню шару карбонізації. Основний механізм дії F-ASP полягає у тому, що термічна стабільність матеріалу покращується завдяки високому ефекту екранування теплової енергії, а продукти розкладання F-ASP не горять. Крім того, крива DTG показує, що загальна швидкість термічного розкладання тканини з покриттям F-ASP нижча, ніж у інших зразків. Під синергетичною дією фторованого PDMS на поверхні швидше утворювався компактний карбонізований шар. У той же час термічна деградація фторованого PDMS також призводить до утворення неорганічного SiO<sub>2</sub> на поверхні, що додатково збільшує товщину та механічну міцність вуглецевого шару [64].

У конструктивному рулонному вогнезахисті використовують не тільки тканинні, а й волокнисті матеріали: скловолокно, мінеральну і базальтову вату на основі тонкого і ультратонкого волокна [65, 66]. Базальтоне супертонке волокно є стійким до високих температур до 700 °С, короткочасно до 900 °С. Так, межа вогнестійкості рулонного матеріалу, виготовленого з надтонкого базальтового волокна товщиною від 5,0 до 16,0 мкм, ламінованого з одного боку алюмінієвою фольгою, становила R 190 [67]. Негорючі матеріали з добавками базальтового супертонкого волокна застосовують для підвищення меж вогнестійкості повітропроводів і металоконструкцій, а також використовують як покриття апаратури побутового та промислового обладнання, транспортних засобів. Результати [68] підтверджують, що переваги для виробництва вогнестійкої тканини має базальтоне волокно, яке використовується у конструктивному вогнезахисті (кожухи, завіси та кришки, як на конструкціях, так і на виробках) для забезпечення високої меж вогнестійкості [69–71].

Автори [65] розробили конструктивний рулонний інтумесцентний вогнезахист для будівельних конструкцій об'єктів капітального будівництва, а також для кабельної продукції. Засіб вогнезахисту являє собою рулонний матеріал з армованою структурою, що спучується в трьох напрямках (3-D) під час впливу термічного удару. Схема композиційних шарів цього виробу представлена на рис 4.



Легенда: (а) для умов горіння стандартної (целюлозної) пожежі; (б) для умов горіння вуглеводневої пожежі;  
1 – термозміцнена базальтова тканина; 2 – керамічне волокно; 3 – мінеральна вата; 4 – листи з металевих сплавів;  
5 – склотканина

Рис. 4. Композитні шари матеріалу [65]

Представлений у роботі [65] комбінований тип покриття, який в залежності від області застосування, показує хороші результати протипожежного захисту завдяки поєднанню обраних шарів. Вогнезахисна ефективність покриттів, отриманих в результаті експериментів, коливається в межах 60–130 хв для стандартної пожежі, 30–93 хв для вуглеводневої пожежі. Такі матеріали можуть застосовуватися в нафтовій і газовій промисловості, при будівництві тунелів, на небезпечних хімічних виробництвах, тому що мають стійкість до вуглеводневого режиму пожежі, ремонтпридатність і високу довговічність в різних кліматичних умовах.

Армування вогнезахисних рулонних покриттів є важливим етапом, що підвищує їх експлуатаційні характеристики. Використання різних видів армуючих матеріалів і технологій дозволяє забезпечити надійний захист від впливу високих температур і механічних пошкоджень, що є ключовим для забезпечення безпеки в умовах пожежі.

**Конструкційні рулонні матеріали як мобільний засіб вогнезахисту боєприпасів при транспортуванні та в польових умовах.**

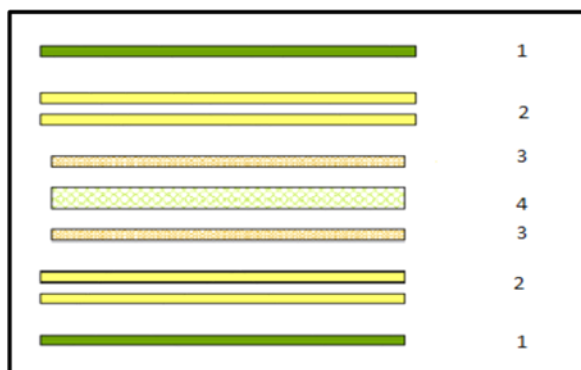
Рулонні матеріали можуть використовуватися як мобільні засоби вогнезахисту, оскільки мають певні переваги:

- портативність: завдяки своїй формі рулонів, ці матеріали легко транспортувати і встановлювати на місці;
- універсальність: такі матеріали можуть бути використані на різних поверхнях;
- ефективність: вони захищають поверхні від вогню або зменшують поширення полум'я;
- простота встановлення: їх можна легко встановити без необхідності спеціалізованих інструментів або досвіду в галузі вогнезахисту.

Одним з ефективних мобільних вогнестійких рулонних матеріалів є вогнезахисні ковдри, які можуть використовуватися для вогнезахисту боєприпасів під час транспортування та в польових умовах. Окрім вогнестійкості, такий матеріал має бути легким, гнучким, водонепроникним, міцним, стійким до розривів і проколів [72].

У роботі [72] розглядається конструкція вогнезахисної ковдри (Fire Barrier Blanket (FBB)), що складається з кількох шарів матеріалів, спеціально підібраних для захисту від високих температур, вогню та/або ударів снарядів. У конструкцію входять керамічна тканина на основі кремнезему, ізоляційний мат із кремнезему, а також тканина з пара-амідних волокон (кевлар) для захисту від уламків, яка має високу міцність і вогнестійкість. Ці шари захищені покриттям із полієфірної тканини з полівінілхлоридом (PVC) для підвищення міцності та захисту від несприятливих погодних умов. Перевагами полієфірних волокон є міцність, довговічність та відносно низька вартість. Полієфіри мають додаткову перевагу у стійкості до плісняви та ультрафіолетового випромінювання (рис. 5) [72].

Результати випробувань показали, що матеріал на основі кремнезему має високу теплостійкість і низьку теплопровідність, що робить його придатним для забезпечення захисту від вогню. Також кремнеземна теплоізоляція є кращою завдяки своїй довговічності та здатності краще переносити деформації, такі як згини та складання. Це важливо для FBB, який має витримувати складні умови застосування під час транспортування, встановлення та використання у польових умовах. На рис. 5 показані матеріали та їх розташування в ковдрі. Послідовність шарів матеріалу ковдри через її товщину симетрична.



Легенда: 1 – один шар полієфірної тканини з ПВХ-покриттям; 2 – два шари кевларової тканини; 3 – один шар кремнеземної тканини; 4 – кремнеземний мат.

Рис. 5. Послідовність укладання матеріалів у вогнезахисній ковдрі [72]

Дослідницька лабораторія армії США (Army Research Laboratory (ARL)) у випробуваннях проникнення вогню використовувала газовий пальник для імітації полум'я від горіння пороху. Критерій, встановлений ARL, полягав у тому, що температура за ковдрою не мала збільшуватися більше ніж на 100°C вище за атмосферну. Матеріали, які входять до складу FBB, не можуть витримати високих температур горіння довго, проте у цьому немає потреби, оскільки порох і сам виводиться з ладу за кілька секунд [72]. Кремнеземна тканина та кремнеземний мат складаються з аморфного волокна з вмістом кремнію  $\geq 94\%$  та діаметром 9 мкм. Теплопровідність при середній температурі 200°C менше 0,071 Вт/(м·К). Під час випробувань на газовому пальнику було виявлено, що температура за ізоляцією підвищується на 100 °C вище за атмосферну протягом 9–11 с. Авторами також розглядається такий важливий аспект проблеми, як система кріплення окремих секцій або модулів FBB одна до одної вздовж усіх країв, що перекриваються, і бічних стінок платформи з боєприпасами, де використовуються пружинні затискачі та реміні, а також комбінація пружинних затискачів та ремінів з липучкою Velcro. Важливо, що всі матеріали ремінів і Velcro є вогнестійкими [72].

Для виготовлення вогнезахисних ковдр використовують шари тканин з волокон як органічних, так і неорганічних полімерів [73, 74–77]. Прикладом використання комбінації тканин на основі неорганічних волокон є система термоізоляції, яка використовується NASA для підвищення термічного опору в гіперзвукових кораблях [73]. Передня та задня поверхні системи складаються з чотирьох шарів алюмоборосилікатної (ABS) тканини з п'ятим внутрішнім шаром кремнеземної тканини. Середина складається з комбінації шарів таких матеріалів: (1) кремнеземний повсть (98,5% SiO<sub>2</sub>), (2) ABS (62% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 14% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і 24% SiO<sub>2</sub>), (3) кремнеземний волокнистий мат (99,9% SiO<sub>2</sub>), (4) глиноземний мат (95% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5% SiO<sub>2</sub>) та (5) кремнеземний повсть (98,5% SiO<sub>2</sub>). Теплові властивості цих шарів наведено в таблиці 1.

Дані табл. 1 показують, що значення коефіцієнта теплової дифузії для матеріалів на основі неорганічних волокон становлять від 0,47 до 0,58 мм<sup>2</sup>/с. Цей коефіцієнт можна розглядати як параметр, що виражає опір проникненню тепла. Автори роблять висновок, що поєднання тканин на основі оксиду алюмінію та кремнезему може використовуватися і під час виробництва вогнезахисних ковдр для боєприпасів.

Таблиця 1

**Теплові властивості шарів системи термоізоляції, що використовує NASA в гіперзвукових кораблях [73]**

Шар	Матеріал	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	Теплоємність, кДж/(кг·К)	Теплопровідність, кВт/(м·К)10 <sup>5</sup>	Коефіцієнт теплової дифузії <sup>1</sup> , мм <sup>2</sup> /с
1	Кремнеземний повсть	96	0,349	1,58	0,47
2	ABS	96	0,388	2,16	0,58
3	Кремнеземний волокнистий мат	136	0,258	1,87	0,53
4	Глиноземний мат	96	0,336	1,80	0,56
5	Кремнеземний повсть	96	0,349	1,58	0,47

Примітка. <sup>1</sup>наведено в [76]

Прикладом використання комбінації тканин на основі органічних і неорганічних полімерних волокон є система, використана для космічного човна Columbia [73]. Система складалася з ватину зі скловолокна, просоченого силіконом, вшитого в чохла з армованої поліімідної плівки, з чергуванням шарів перфорованої поліімідної плівки та PET. Авторами [73] була розроблена вогнестійка ковдра для захисту боєприпасів, яка складається з параарамідних і керамічних волокон. Балістичні характеристики ковдри забезпечують захист від

осколків масою 300 г і 454 г, що рухалися зі швидкостями 140 м/с і 60 м/с відповідно. Були проведені експерименти з вогнепроникності на тканинах та матеріалах покриття, які могли бути використані при розробці FBB. Випробування мали на меті імітувати умови, створені під час горіння палива, що лежить на поверхні FBB. При випробуваннях з застосуванням газового пальника ковдра забезпечувала захист від полум'я, коли температура перевищувала 1200 °С, протягом 10 с.

Зразки вогнезахисних ковдр також були досліджені в установці, яка визначає проникнення тепла (склад зразків наведено в табл. 2). Перші три зразки були тонкими (№ 1, 2, 3) (5 мм), а інші три (№ 4, 5, 6) товстими (20–25 мм). Перегляд профілів температури передньої та задньої поверхні зразків на рис. 6–8 вказує на те, що затримка підвищення температури задньої поверхні залежить від товщини та складу зразка.

Для тонких зразків (№ 1, 2, 3) підвищення температури задньої поверхні почалося між ~20 та 60 с (приклади на рис. 6 і 7). Для більш товстих зразків (товщина 20-25 мм, № 4, 5, 6) підвищення температури задньої поверхні почалося між ~80 і 130 с (приклад на рис. 8).

Таблиця 2

**Зразки ковдр FBB для експерименту з проникнення тепла [73]**

Зразок	Послідовність шарів у зразку	Товщина, мм
1	Алюміній. ABS. Алюміній	5, поверхня, пофарбована в чорний колір
2	Кремнеземне волокно. Керамічне волокно. Кремнеземне волокно.	5, бежевий колір
3	Керамічна тканина. Керамічна ковдра. Керамічна тканина.	5, бежевий колір
4	Фольга з нержавіючої сталі. Керамічне волокно. Кремнеземне волокно.	20, срібний/бежевий колір
5	Поліорганосилоксан. Керамічне волокно. Кремнеземне волокно.	20, бежевий колір
6	Фольга з нержавіючої сталі. Керамічне волокно. Алюміній.	25, срібний/ блискучий колір

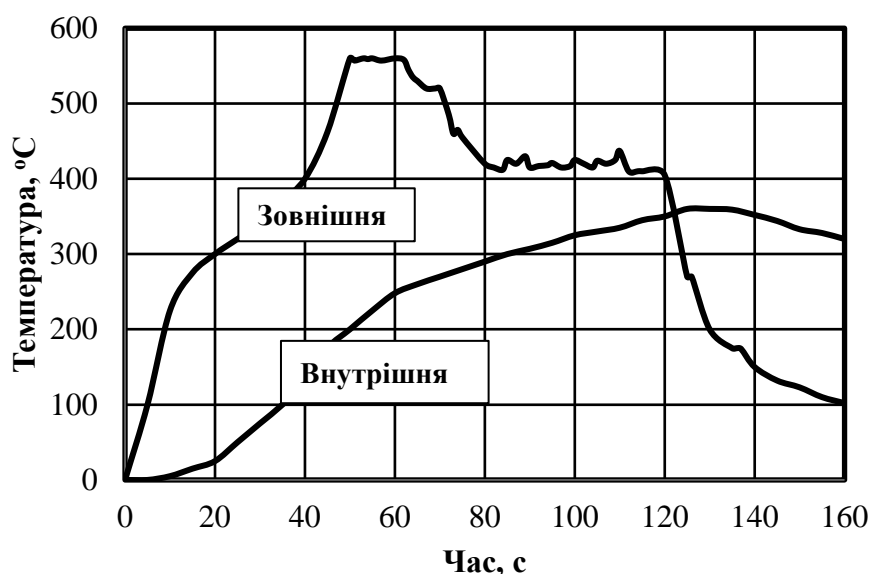


Рис.6. Середня температура зовнішньої та внутрішньої поверхонь в центрі зразка № 1 товщиною 5 мм (84 кВт/м<sup>2</sup> протягом 120 с) [73]

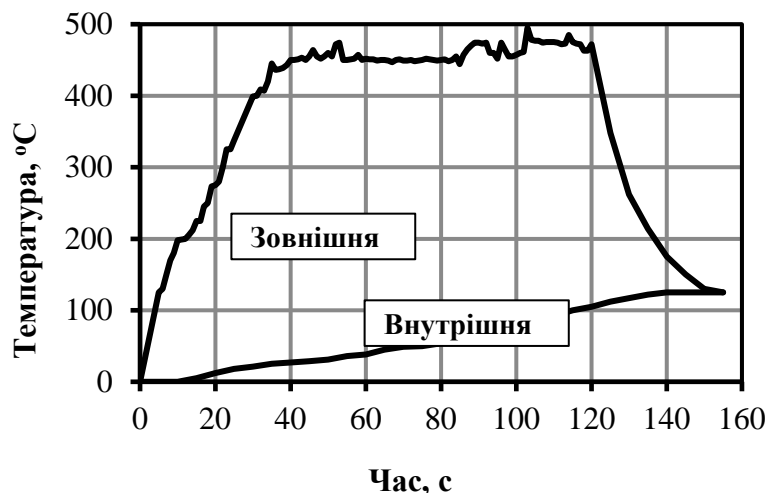


Рис. 7. Середня температура зовнішньої та внутрішньої поверхонь вище температури навколишнього середовища зразка № 2 товщиною 5 мм (84 кВт/м<sup>2</sup> протягом 120 с) [73]

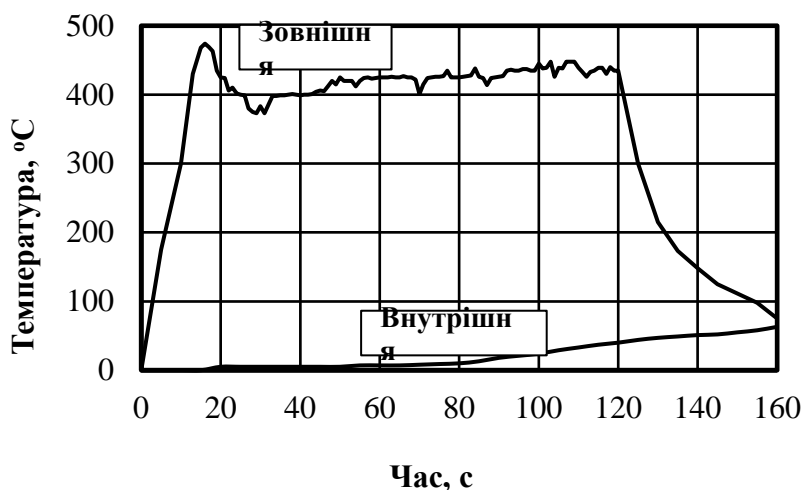


Рис. 8. Середня температура зовнішньої та внутрішньої поверхонь в центрі зразка №6 товщиною 25 мм. (84 кВт/м<sup>2</sup> протягом 120 с) [73]

Ф. Takahashi [78] дослідив теплові характеристики відносно тонких (0,15-3,7 мм) вогнезахисних ковдр інтумесцентного типу, до складу яких включено групи із чотирьох різних волокон: арамідне, скловолокно, аморфний кремнезем і вуглецеве волокно та їх композити. Зразок без домішок або з додаванням волокон піддавали тепловому потоку (до 84 кВт/м<sup>2</sup>) за допомогою газового пальника та конусного нагрівача переважно за рахунок конвекції або випромінювання [78]. Автори [78] оцінювали термоізоляційні властивості пінококсового шару вогнезахисних ковдр за допомогою коефіцієнта теплового блокування (Heat Blocking Efficiency, HBE) за вимірними температурами і тепловим потоком, що проходить через зразок в стаціонарному стані:

$$HBE = \left[ 1 - \frac{\text{Переданий тепловий потік}}{\text{Падаючий тепловий потік}} \right] \times 100\%. \quad (1)$$

Оскільки пінококсовий шар є пористим середовищем, внутрішня теплопередача включає як теплопровідність, так і випромінювання. Теплопровідність відбувається переважно через тверду фазу, а випромінювання – в газовій фазі між стінками пор при різних температурах.

Для більшості зразків коефіцієнти НВЕ (рівняння 1) становили приблизно  $70 \pm 10\%$  як для конвекції, так і для випромінювання, і лише незначно збільшувалися зі збільшенням товщини зразка або падаючого теплового потоку. Неткані (повстяні) матеріали з низькою теплопровідністю показали значно кращу ізоляцію (до 87%) проти конвективного тепла. Матеріали з алюмінієвим покриттям продемонстрували винятково високі значення НВЕ (до 98%) для випромінювання, тоді як вуглецеве і арамідне волокна показали нижчі значення НВЕ (до 50%) через ефективне поглинання випромінювання.

Для фіксованої товщини зразків значення НВЕ (конвективне тепло) змінюються таким чином: вуглецеве волокно (неткане) > арамідне волокно/ вуглецеве волокно /скловолокно > вуглецеве волокно (ткане) > скловолокно  $\approx$  арамідне волокно/скловолокно  $\approx$  кремнезем. Тонкі ( $\approx 1$  мм) вогнезахисні ковдри продемонстрували високі коефіцієнти теплового блокування (60–90%), що можна порівняти з показниками пінококсового шару товщиною  $\approx 20$  мм вогнезахисного покриття. Вогнезахисні ковдри підходять не тільки для термоізоляції та пригнічення невеликих пожеж, але й для захисту від прямого контакту з полум'ям [78].

Ф. Takahashi зі співавторами [78, 79] довели, що для конвективного падаючого теплового потоку втрата тепла через випромінювання з високотемпературних поверхонь і ефективна теплоізоляція за допомогою матеріалу ковдри є основними механізмами теплопередачі для відносно високих НВЕ. Що стосується падаючого теплового потоку за рахунок випромінювання, алюмінізовані матеріали з високою відбивною здатністю призводять до надзвичайно високих показників НВЕ.

Слід зазначити, що наукових досліджень стосовно підвищення ефективності протипожежних ковдр бракує порівняно з роботами, пов'язаними з підвищенням вогнестійкості тканин. Ефективність протипожежних ковдр при тривалому впливі тепла мало відома, незважаючи на її важливість у випадку спалаху від конструкції до конструкції. Такі аспекти як механізми блокування тепла та ефективність одно- та багат шарових матеріалів потребують додаткового вивчення. Вплив нових матеріалів на довкілля та їх довговічність в польових умовах для забезпечення тривалої експлуатації без втрати захисних властивостей також вимагає подальших досліджень.

### **Висновки.**

Розглянутий літературний матеріал дозволяє визначити основні напрямки розроблення вогнезахисних рулонних матеріалів, які спрямовані на покращення вогнестійкості, механічних властивостей та загальної ефективності матеріалів:

- використання нових вогнезахисних добавок та наповнювачів. Сучасні вогнезахисні рулонні матеріали включають інноваційні добавки та наповнювачі, такі як наноматеріали (наприклад, наноглини, нановолокна), які підвищують вогнестійкість та механічну міцність. Використання нанотехнологій дозволяє створити бар'єрні шари, які уповільнюють поширення вогню та покращують ізоляційні властивості;

- комбіновані системи армування. Комбінування різних армуючих матеріалів, таких як скловолокно, вуглеволокно та базальтові волокна, дозволяє досягти високої механічної міцності та термостійкості. Такі системи забезпечують підвищену стійкість до розривів та механічних пошкоджень при дії високих температур;

- використання інтумесцентних систем, що поєднують у собі теплову ізоляцію, механічний захист та запобігання доступу кисню. Їхня здатність багаторазово збільшуватися в об'ємі при нагріванні дозволяє створювати міцний захисний бар'єр, забезпечуючи надійний захист конструкцій в умовах пожежі;

- створення матеріалів, що поєднують у собі властивості кількох різних компонентів, наприклад, полімерів та неорганічних сполук. Такі матеріали мають високу термостійкість, механічну міцність і довговічність;

- екологічно чисті та безпечні матеріали. Сучасні тенденції також включають розробку вогнезахисних матеріалів, які не містять шкідливих для здоров'я та довкілля речовин. Екологічно чисті вогнезахисні добавки, такі як фосфорорганічні сполуки та модифіковані полімери, стають все більш популярними.

Найбільш перспективними є вогнезахисні рулонні матеріали, які містять у своєму складі реактивні системи вогнезахисту – покриття інтумесцентного типу. Такі матеріали можуть бути застосовані не лише для забезпечення зберігання боєприпасів. Вони можуть бути основою для організації мобільного вогнезахисту конструкцій у місцях дислокації особового складу, а також для створення надійних протипожежних рішень для захисту від руйнівної дії пожежі.

### References

### Література

1. Vakhitova, L. M., Kalafat, K. V., Taran, N. A., Drizhd, V. L. (2015). Khimichni rishennia problem z vohnezakhystu [Chemical solutions to fire protection problems]. *Nauka ta innovatsii = Science and innovation*, 11 (6), 47–56. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/scin11.06.047> [in Ukrainian].
1. Вахітова Л. М., Калафат К. В., Таран Н. А., Дріжд В. Л. Хімічні рішення проблем з вогнезахисту. *Наука та інновації*. 2015. № 11 (6). С. 47–56. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/scin11.06.047>.
2. Brent, K. M., T'ien, J. S. (2022). Performance optimization of thin fire blankets by varying their radiative properties. *Journal of Fire Sciences*, 40(1), 26–43. doi:10.1177/07349041211050328.
2. Brent K. M., T'ien J. S. Performance optimization of thin fire blankets by varying their radiative properties. *Journal of Fire Sciences*. 2022. № 40 (1). P. 26–43. doi:10.1177/07349041211050328.
3. Yang, W., Abu Bakar, B. H., Mamat, H., Gong, L. (2022). A New, Green, Recyclable Fireproof Insulation Board for Use in Integrated Composite Structure Fire Protection Systems. *Fire*, 5, 203. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire5060203>.
3. Yang W., Abu Bakar B. H., Mamat H., Gong L. A New, green, recyclable fireproof insulation board for use in integrated composite structure fire protection systems. *Fire*. 2022. № 5. Art. 203. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire5060203>.
4. Tewardson, A., Wu, P. K., Chin, W. K., Shuford, R. (2001). Fire Blankets for Munition Protection: Flame and Heat Blocking Properties of Advanced Materials (ARL-TR-2398, Army Research Laboratory). 55 p. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA387272.pdf>.
4. Tewardson A., Wu P. K., Chin W. K., Shuford R. Fire Blankets for Munition Protection: Flame and Heat Blocking Properties of Advanced Materials (ARL-TR-2398, Army Research Laboratory). 2001. 55 p. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA387272.pdf>.
5. UNODA (2021). International Ammunition Technical Guidelines (IATG 01.10). United Nations Office for Disarmament Affairs (UNODA). New York. 1354 p.
5. International Ammunition Technical Guidelines (IATG 01.10) United Nations Office for Disarmament Affairs (UNODA). New York, 2021. 1354 p.
6. Veselivskiy, R. B., Smoliak, D. V. (2021). Сposoby vohnezakhystu metalevykh budivelnykh konstruktsii [Methods of fire protection of metal building structures]. *Pozhezhna bezpeka = Fire safety*, 39, 63–76 [in Ukrainian].
6. Веселівський Р. Б., Смоляк Д. В. Способи вогнезахисту металевих будівельних конструкцій. *Пожежна безпека*. 2021. Вип. 1. № 39. С. 63–76.
7. de Silva, D., Nuzzo, I., Nigro, E., Occhiuzzi, A. (2022). Intumescent coatings for fire resistance of steel structures: current approaches for qualification and design. *Coatings*, 2 (5), 696.
7. de Silva D., Nuzzo I., Nigro E., Occhiuzzi A. Intumescent coatings for fire resistance of steel structures: current approaches for qualification and design. *Coating*. 2022. № 2 (5). Art. 696.
8. Fire-resistant Coatings Market by Type (Intumescent Coatings, Cementitious Coatings), Technology (Solvent-borne, Water-borne), Substrates (Metal, Wood), Application Technique (Spray, Brush & Roller),
8. Fire-resistant Coatings Market by Type (Intumescent Coatings, Cementitious Coatings), Technology (Solvent-borne, Water-borne), Substrates (Metal, Wood), Application

- Application and Region – Global Forecast to 2026. Research and Markets, 2022. 480 p. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5211858/fire-resistant-coatings-market-by-type>.
9. Kalafat, K. V., Vakhitova, L. N. (2021). Analiticheskiy obzor sredstv ognезaschityi stalnyih konstruktsiy 2021–2022 [Analytical review of fire protection means for steel structures 2021–2022]. Kyiv: UtsSS. 230 p. [in Russian].
10. Liu, X. D., Qin, S, Li., H. F. et al. (2019). Combination intumescent and kaolin-filled multilayer nanocoatings that reduce polyurethane flammability. *Macromolecular Materials and Engineering*, 304 (2), 180053.
11. Fox, D. M., Cho, W., Dubrulle, L, Grützmacher, P. G., Zammarano, M. (2020). Intumescent polydopamine coatings for fire protection. *Green Materials*, 1900065. 10 p.
12. Zehfuß, J., Sander, L. (2021). Gypsum plasterboards under natural fire – Experimental investigations of thermal properties. *Civil Engineering Design*, 3(3), 62–72.
13. Park, S. H., Manzello, S. L., Bentz, D. P., Mizukami T. (2009). Determining thermal properties of gypsum board at elevated temperatures. *Fire and Materials*, 34, 237–250.
14. Kolarkar, P., Mahendran, M. (2014). Experimental studies of gypsum plasterboards and composite panels under fire conditions. *Fire and Materials*, 38(1), 13–35.
15. Caetano, H., Laím, L., Santiago, A., Durães, L. Shahbazian, A. (2022). Development of passive fire protection mortars. *Appl. Sci.*, 12, 2093.
16. Veselivskiy, R. B., Yakovchuk, R. S., Vasylenko, O. O., Semeniuk, P. V. (2015). Eksperymentalne doslidzhennia vohnestii kosti ohorodzhuvalnykh konstruktsii z hipsokartonny my plytamy. [Experimental study of the fire resistance of enclosing structures with gypsum plasterboards]. *Pozhezhna bezpeka = Fire safety*, 27, 26–32 [in Ukrainian].
17. DBN V.1.1-7-2002. Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy / Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy [DBN V.1.1-7-2002. Fire safety of construction objects. General requirements / Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine]. Kyiv, 2017. 38 p. [in Ukrainian].
18. Pat. 6565040 US, IPC B64C 1/40. Burn through resistant systems for transportation, especially aircraft / Fay R. M. (US), Wulliman R. S. (US), Stacy J. W. (US), Townsend J. C. (US), Volenec S. N (US), inventors; Johns Manville International Inc. (US), assignee – No. Technique (Spray, Brush & Roller), Application and Region – Global Forecast to 2026. Research and Markets, 2022. 480 p. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5211858/fire-resistant-coatings-market-by-type>.
9. Калафат К. В., Вахитова Л. Н. Аналитический обзор средств огнезащиты стальных конструкций 2021–2022. К.: УЦСС, 2021. 230 с.
10. Liu X. D., Qin S, Li. H. F. et al. Combination intumescent and kaolin-filled multilayer nanocoatings that reduce polyurethane flammability. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2019. Vol. 304 (2). Art. 180053.
11. Fox D. M., Cho W., Dubrulle L, Grützmacher P. G., Zammarano M. Intumescent polydopamine coatings for fire protection. *Green Materials*. 2020. 1900065. 10 p.
12. Zehfuß J., Sander L. Gypsum plasterboards under natural fire – Experimental investigations of thermal properties. *Civil Engineering Design*. 2021. № 3(3). P. 62–72.
13. Park S. H., Manzello S. L., Bentz D. P., Mizukami T. Determining thermal properties of gypsum board at elevated temperatures. *Fire and Materials*. 2009. Vol. 34. P. 237–250.
14. Kolarkar P., Mahendran M. Experimental studies of gypsum plasterboards and composite panels under fire conditions. *Fire and Materials*. 2014. Vol. 38 (1). P. 13–35.
15. Caetano H., Laím L., Santiago A., Durães L. Shahbazian A. Development of passive fire protection mortars. *Appl. Sci*. 2022. № 12. Art. 2093.
16. Веселівський Р. Б., Яковчук Р. С., Василенко О. О., Семенюк П. В. Експериментальне дослідження вогнестійкості огорожувальних конструкцій з гіпсокартонними плитами. *Пожежна безпека*. 2015. Vol. 27. P. 26–32.
17. ДБН В.1.1-7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. Київ, 2017. 38 с.
18. Pat. 6565040 US, IPC B64C 1/40. Burn through resistant systems for transportation, especially aircraft / Fay R. M. (US), Wulliman R. S. (US), Stacy J. W. (US), Townsend J. C. (US), Volenec S. N (US), inventors; Johns

US20020017590; applied for on 09.10.2001; published on 20.05.2003. URL: <https://www.uspto.gov>.

19. ASTM E119 Standard test methods for fire tests of building construction and materials. 2017. 22 p. URL: <https://www.astm.org/e0119-05a.html>.

20. Pat. 3913290 US, IPC E04F 13/06, E04C 31293. Fire insulation edge reinforcements for structural members / Billing R. W. (US), Castle G. K. (US), inventors; Avco Corp. Appl. (US), assignee – No. US 478844; applied for on 13.06.1974; published on 21.10.1975. URL: <https://www.uspto.gov>.

21. Pat. 3915777 US, IPC C09D 5/18. Method of applying fire-retardant coating materials to a substrate having corners or other sharp edges / Kaplan B. B. (US), inventor; Albi Manuf. Co Inc. Appl. (US), assignee – No. US 368140; applied for on 08.06. 1973; published on 28.10.1975. URL: <https://www.uspto.gov>.

22. Pat. 10533318 US, IPC E04B 1/944, E04B 1/947. Prefabricated form for fireproofing structural steel and method of use / Miller P. G., Pool R. B., inventors; Alfred Miller Contracting Co (US), assignee. – No. US15/892910; applied for on 09.02.2018; published on 14.01.2021. URL: <https://www.uspto.gov>.

23. Pat. 8292027 US, IPC E4B I/84, D04B I/00. Composite laminate for a thermal and acoustic insulation blanket / Richardson L. B. (US), KnoffJian W. F. (US), Wang J. (US), inventors; DuPont Safety and Construction Inc. (US), assignee. – No.US20110094826 (US); applied for on 14.04. 2010; published on 23.10.2012. URL: <https://www.uspto.gov>.

24. Pat. 7767597 US, IPC D04H IMO, B32B 27/12. Fire barrier film laminate / Garvey C. E. (US), inventor; Unifrax I. LLC. (US), assignee – № US12/008040; applied for on 08.01.2008; published on 03.08.2010. URL: <https://www.uspto.gov>.

25. Pat. 6670291 US, IPC C03C 25/32, C03C 25/42. Laminate sheet material for fare barrier applications / Tompkins T. L. (US), Vogel-Martin M. M. (US), inventors; 3M Innovative Properties Co (US), assignee – No. US09/691575; applied for on 10.18.2000; published on 12.30.2003. URL: <https://www.uspto.gov>.

26. Kandola, B. K., Luangtriratana, P., Duquesne, S., Bourbigot, S. (2015). The Effects of Thermophysical Properties and Environmental Conditions on Fire

Manville International Inc. (US), assignee – No. US20020017590; applied for on 09.10.2001; published on 20.05.2003. URL: <https://www.uspto.gov>.

19. ASTM E119 Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. 2017. 22 p. URL: <https://www.astm.org/e0119-05a.html>.

20. Pat. 3913290 US, IPC E04F 13/06, E04C 31293. Fire insulation edge reinforcements for structural members / Billing R. W. (US), Castle G. K. (US), inventors; Avco Corp. Appl. (US), assignee – No. US 478844; applied for on 13.06.1974; published on 21.10.1975. URL: <https://www.uspto.gov>.

21. Pat. 3915777 US, IPC C09D 5/18. Method of applying fire-retardant coating materials to a substrate having corners or other sharp edges / Kaplan B. B. (US), inventor; Albi Manuf. Co Inc. Appl. (US), assignee – No. US 368140; applied for on 08.06. 1973; published on 28.10.1975. URL: <https://www.uspto.gov>.

22. Pat. 10533318 US, IPC E04B 1/944, E04B 1/947. Prefabricated form for fireproofing structural steel and method of use / Miller P. G., Pool R. B., inventors; Alfred Miller Contracting Co (US), assignee. – No. US15/892910; applied for on 09.02.2018; published on 14.01.2021. URL: <https://www.uspto.gov>.

23. Pat. 8292027 US, IPC E4B I/84, D04B I/00. Composite laminate for a thermal and acoustic insulation blanket / Richardson L. B. (US), KnoffJian W. F. (US), Wang J. (US), inventors; DuPont Safety and Construction Inc. (US), assignee. – No.US20110094826 (US); applied for on 14.04. 2010; published on 23.10.2012. URL: <https://www.uspto.gov>.

24. Pat. 7767597 US, IPC D04H IMO, B32B 27/12. Fire barrier film laminate / Garvey C. E. (US), inventor; Unifrax I. LLC. (US), assignee – № US12/008040; applied for on 08.01.2008; published on 03.08.2010. URL: <https://www.uspto.gov>.

25. Pat. 6670291 US, IPC C03C 25/32, C03C 25/42. Laminate sheet material for fare barrier applications / Tompkins T. L. (US), Vogel-Martin M. M. (US), inventors; 3M Innovative Properties Co (US), assignee – No. US09/691575; applied for on 10.18.2000; published on 12.30.2003. URL: <https://www.uspto.gov>.

26. Kandola B. K., Luangtriratana P., Duquesne S., Bourbigot S. The Effects of Thermophysical Properties and Environmental Conditions on

- Performance of Intumescent Coatings on Glass Fibre-Reinforced Epoxy Composites. *Materials*, 8, 5216–5237.
27. Pat. 4069075 US, IPC E04B1/943. Structural support for char derived from intumescent coatings / Billing R. W. (US), Castle G. K. (US), inventors; Current Assignee Avco Corp. (US), assignee – No. US05/544168; applied for on 27.01.1975; published on 17.01.1978. URL: <https://www.uspto.gov>.
28. Nolan, D. P. (2019). Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities. noyes publications. Westwood. 426 p.
29. Pat. 2938283 CA, IPC B05D1/18, B05D3/042. Intumescent grid / Wall W. (CA), Wall A. (CA), Adab S. (CA), inventors; Canadian Borax Inc. Appl. (CA), assignee – No. CA2938283A, applied for on 05.08.2016; published on 05.02.2018. URL: <https://patents.google.com>.
30. Pat. 4069075 US, IPC B29C 25/00. Structural support for char derved from intumescent coatings / Billing R.W. (US), Castle G.K. (US), inventors; Avco Corp. (US), assignee – No. US05/544168; applied for on 27.01.1975; published on 17.01.1978. URL: <https://www.uspto.gov>.
31. Minkin, D. Y., Mironchev, A. V., Tursenev, S. A. (2017). Technologies of maintaining fire safety of the offshore oil and gas fields facilities. *Pollution Research*, 36 (3), 640–644.
32. Gravit, M., Gumerova, E., Bardin, A., Lukinov, V. (2018). Increase of fire resistance limits of building structures of oil and gas complex under hydrocarbon fire. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. Murgul V. and Popovic Z. (eds.). Springer International Publishing AG. P. 818–829.
33. Fox, D. M., Cho, W., Dubrulle, L., Grützmacher, P. G., Zammarano, M. (2020). Intumescent polydopamine coatings for fire protection. *Green Materials*, 1900065.
34. Narasimhan, J. H., Giuliani, L., Jomaas, G. (2019). Development of fire protection for bridge cable systems. *The 14th Nordic Steel Construction Conference* (Copenhagen, September 18–20, 2019), 3, 671–676.
35. Triantafyllidis, Z., Bisby, L. A. (2020). Fibre-reinforced intumescent fire protection coatings as a confining material for concrete columns. *Construction and Building Materials*, 231, 117085.
- Fire Performance of Intumescent Coatings on Glass Fibre-Reinforced Epoxy Composites. *Materials*. 2015. Vol. 8. P. 5216–5237.
27. Pat. 4069075 US, IPC E04B1/943. Structural support for char derived from intumescent coatings / Billing R. W. (US), Castle G. K. (US), inventors; Current Assignee Avco Corp. (US), assignee – No. US05/544168; applied for on 27.01.1975; published on 17.01.1978. URL: <https://www.uspto.gov>.
28. Nolan D.P. Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities. noyes publications. Westwood, 2019. 426 p.
29. Pat. 2938283 CA, IPC B05D1/18, B05D3/042. Intumescent grid / Wall W. (CA), Wall A. (CA), Adab S. (CA), inventors; Canadian Borax Inc. Appl. (CA), assignee – No. CA2938283A, applied for on 05.08.2016; published on 05.02.2018. URL: <https://patents.google.com>.
30. Pat. 4069075 US, IPC B29C 25/00. Structural support for char derved from intumescent coatings / Billing R.W. (US), Castle G.K. (US), inventors; Avco Corp. (US), assignee – No. US05/544168; applied for on 27.01.1975; published on 17.01.1978. URL: <https://www.uspto.gov>.
31. Minkin D. Y., Mironchev A. V., Tursenev S. A. Technologies of maintaining fire safety of the offshore oil and gas fields facilities. *Pollution Research*. 2017. Vol. 36 (3). P. 640–644.
32. Gravit M., Gumerova E., Bardin A., Lukinov V. Increase of fire resistance limits of building structures of oil and gas complex under hydrocarbon fire. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. Murgul V. and Popovic Z. (eds.). Springer International Publishing AG., 2018. P. 818–829.
33. Fox D. M., Cho W., Dubrulle L., Grützmacher P. G., Zammarano M. Intumescent polydopamine coatings for fire protection. *Green Materials*. 2020. Art. 1900065.
34. Narasimhan J. H., Giuliani L., Jomaas G. Development of fire protection for bridge cable systems. *The 14th Nordic Steel Construction Conference* (Copenhagen, September 18–20, 2019). 2019. Vol. 3. P. 671–676.
35. Triantafyllidis Z., Bisby L. A. Fibre-reinforced intumescent fire protection coatings as a confining material for concrete columns.

36. Application 2016194766 WO, IPC D03D15/513. Flame-retardant fabric and protective clothing in which the same is used / inventor-applicant Yoshitomo Matsumoto Miwo Wataru (CN) – No. CN201680031673.0A; applied for on 26.05.2016; published on 08.12.2016. URL: <https://patents.google.com>.
37. Chowdhury, A. K. R. (2020). Flame Retardants for Textile Materials. CRC Press. 94 p.
38. Application 2017121922 US, IPC E02B3/122. Production and application of fire resistant eroision control mat / Lipscomb C. M. (US), inventor; Westerngreen LLC (US), applicant – No. 15/330240 US; applied for on 26.08.2016; published on 03.07.2018. URL: <https://www.uspto.gov>.
39. Pat. 3053484 EP, IPC A47C31/001. Fire resistant mattresses, fire resistant mattress cover materials and related methods / Lowe V. J. (US) inventor; Trafalgar Associates LLC (US), assignee – No. US15/019330; applied for on 17.06.2015; published on 15.11.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
40. Application 2016178057 WO, IPC D06N3/005. Method for producing flame retardant and/or waterproof multilayer fabric and flame retardant and/or waterproof multilayer fabric / Canonico S.B. (IT), inventor; Pratrivero S.P.A. (IT), applicant – No. PCT/IB2015/053248; applied for on 04.05.2015; published on 10.11.2016. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
41. Alongi, J., Carosio, F., Malucelli, G. (2014). Current emerging techniques to impart flame retardancy to fabrics: an overview. *Polym. Degrad. Stabil.*, 106, 138–149.
42. Qi, P., Chen, F., Li, Y., Li, H., Gu, X., Sun, J., Zhang, S. (2023). A review of durable flame retardant fabrics by finishing: fabrication strategies and challenges. *Adv. Fiber Mater.*, 5 (3), 731–763.
43. Application 2017129783WO, IPC C09D5/185. Textiles having flame protection function / Lottenbach R. (CH), Gartmann V. (CH), inventors; Schoeller Textil Ag (CH), applicant – No. PCT/EP2017/051831; applied for on 27.01.2017; published on 03.08.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
44. Pat. 3173390 EP, IPC C03C25/321. Flat textile substrate with at least partial fire protection coating, method
- Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 231. Art. 117085.
36. Application 2016194766 WO, IPC D03D15/513. Flame-retardant fabric and protective clothing in which the same is used / inventor-applicant Yoshitomo Matsumoto Miwo Wataru (CN) – No. CN201680031673.0A; applied for on 26.05.2016; published on 08.12.2016. URL: <https://patents.google.com>.
37. Chowdhury A. K. R. Flame Retardants for Textile Materials. CRC Press, 2020. 94 p.
38. Application 2017121922 US, IPC E02B3/122. Production and application of fire resistant eroision control mat / Lipscomb C. M. (US), inventor; Westerngreen LLC (US), applicant – No. 15/330240 US; applied for on 26.08.2016; published on 03.07.2018. URL: <https://www.uspto.gov>.
39. Pat. 3053484 EP, IPC A47C31/001. Fire resistant mattresses, fire resistant mattress cover materials and related methods / Lowe V. J. (US) inventor; Trafalgar Associates LLC (US), assignee – No. US15/019330; applied for on 17.06.2015; published on 15.11.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
40. Application 2016178057 WO, IPC D06N3/005. Method for producing flame retardant and/or waterproof multilayer fabric and flame retardant and/or waterproof multilayer fabric / Canonico S.B. (IT), inventor; Pratrivero S.P.A. (IT), applicant – No. PCT/IB2015/053248; applied for on 04.05.2015; published on 10.11.2016. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
41. Alongi J., Carosio F., Malucelli G. Current emerging techniques to impart flame retardancy to fabrics: an overview. *Polym. Degrad. Stabil.* 2014. Vol. 106. P. 138–149.
42. Qi P., Chen F., Li Y., Li H., Gu X., Sun J., Zhang S. A review of durable flame retardant fabrics by finishing: fabrication strategies and challenges. *Adv. Fiber Mater.* 2023. Vol. 5 (3). P. 731–763.
43. Application 2017129783WO, IPC C09D5/185. Textiles having flame protection function / Lottenbach R. (CH), Gartmann V. (CH), inventors; Schoeller Textil Ag (CH), applicant – No. PCT/EP2017/051831; applied for on 27.01.2017; published on 03.08.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
44. Pat. 3173390 EP, IPC C03C25/321. Flat textile substrate with at least partial fire

- for its production and uses thereof/ Zettl H. (DE), inventor; Vitrolan Textile Glass GmbH (DE), assignee – № DK15196448.3T; applied for on 26.11.2015; published on 31.05.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
45. Khaydarov, I. N., Ismailov, R. I., Ismailova, R. M., Yokubova, N. F., Baysenbaev, O. K. (2020). Chemical characterization flame retardant suspensions for impregnation of cellulose materials. *Technical science and innovation* (TSTU, Tashkent), 3, 24–31.
46. Herlinger, H., Haroltmann, G., Hermanutz, F. (1991). Preparation of flame-retardant polyacrylonitrile fibers by introducing polymer phosphorus compounds into the spinning solution. *Melliand Textilber*, 72(5), 353–359.
47. Pat. 3374441 EP, IPC C09D 5/18, C07F 9/6571. Materials having a fire-resistant coating containing a spiroposphonate / Butz V. (DE), inventor; Thor GmbH (DE), assignee – No. EP16794514.6A; applied for on 28.10.2016; published on 19.09.2018. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
48. Application 2016189396 WO, IPC A62B17/003. Fire extinguishing impregnating agent and its use in absorbent textiles and fire suit resistant to direct flame and fire evacuation device for use in direct flame / Lučanik A. (SZ), inventor; Dytrt P. (SZ), Lučanik A. (SZ), applicant – No. PCT/IB2016/001197; applied for on 27.05.2012; published on 12.01.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
49. Liu, J., Sun, Y., Ma, R., Zhou, X., Ye, L., Mailander, V., Steffen, W., Kappl, M., Butt, H.-J. (2022). Mechanically robust and flame-retardant superhydrophobic textiles with antibiofouling performance. *Langmuir*, 38 (42), 12961–12967.
50. Xue, C. H., Wu, Y., Guo, X. J., Liu, B. Y., Wang, H. D., Jia, S. T. (2020). Superhydrophobic, flame retardant and constructive cotton fabrics via layer-by-layer assembly of carbon nanotubes for flexible sensing electronics. *Cellulose*, 27, 3455–3468.
51. Qi, L., Qiu, S., Xi, J., Yu, B., Hu, Y., Xing, W. (2022). Construction of super-hydrophobic, highly effective flame retardant coating for cotton fabric with super Washability and abrasion resistance, *J. Colloid Interface Sci.*, 607, 2019–2028.
52. Application 2017091976 WO, IPC D06M11/70. Expandable flame retardant system for flame retardant of mattress or pillow inner sleeve filler and method of its use protection coating, method for its production and uses thereof/ Zettl H. (DE), inventor; Vitrolan Textile Glass GmbH (DE), assignee – № DK15196448.3T; applied for on 26.11.2015; published on 31.05.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
45. Khaydarov I. N., Ismailov R. I., Ismailova R. M., Yokubova N. F., Baysenbaev O. K. Chemical characterization flame retardant suspensions for impregnation of cellulose materials. *Technical science and innovation* (TSTU, Tashkent). 2020. № 3. P. 24–31.
46. Herlinger H., Haroltmann G., Hermanutz F. Preparation of flame-retardant polyacrylonitrile fibers by introducing polymer phosphorus compounds into the spinning solution. *Melliand Textilber*. 1991. Vol. 72 (5). P. 353–359.
47. Pat. 3374441 EP, IPC C09D 5/18, C07F 9/6571. Materials having a fire-resistant coating containing a spiroposphonate / Butz V. (DE), inventor; Thor GmbH (DE), assignee – No. EP16794514.6A; applied for on 28.10.2016; published on 19.09.2018. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
48. Application 2016189396 WO, IPC A62B17/003. Fire extinguishing impregnating agent and its use in absorbent textiles and fire suit resistant to direct flame and fire evacuation device for use in direct flame / Lučanik A. (SZ), inventor; Dytrt P. (SZ), Lučanik A. (SZ), applicant – No. PCT/IB2016/001197; applied for on 27.05.2012; published on 12.01.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
49. Liu J., Sun Y., Ma R., Zhou X., Ye L., Mailander V., Steffen W., Kappl M., Butt H.-J. Mechanically robust and flame-retardant superhydrophobic textiles with antibiofouling performance. *Langmuir*. 2022. Vol. 38 (42). P. 12961–12967.
50. Xue C. H., Wu Y., Guo X. J., Liu B. Y., Wang H. D., Jia S. T. Superhydrophobic, flame retardant and constructive cotton fabrics via layer-by-layer assembly of carbon nanotubes for flexible sensing electronics. *Cellulose*. 2020. Vol. 27. P. 3455–3468.
51. Qi L., Qiu S., Xi J., Yu B., Hu Y., Xing W. Construction of super-hydrophobic, highly effective flame retardant coating for cotton fabric with super Washability and abrasion resistance, *J. Colloid Interface Sci.* 2022. Vol. 607. P. 2019–2028.
52. Application 2017091976 WO, IPC D06M11/70. Expandable flame retardant system for flame retardant of mattress or pillow

- / Chen Jie (CN), inventor-applicant – inner sleeve filler and method of its use / Chen Jie (CN), inventor-applicant – No. PCT/CN2015/096123; applied for on 01.12.2015; published on 08.06.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>. No. PCT/CN2015/096123; applied for on 01.12.2015; published on 08.06.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
53. He, Q., Wang, J., Wang, G., Ha, X., Li, A. (2023). Construction of a durable superhydrophobic flame-retardant coating on the PET fabrics. *Materials & Design*, 33, 112258.
53. He Q., Wang J., Wang G., Ha X., Li A. Construction of a durable superhydrophobic flame-retardant coating on the PET fabrics. *Materials & Design*. 2023. Vol. 33. Art. 112258.
54. Baddam, Y., Ijaola, A. O., Asmatulu, E. (2021). Fabrication of flame-retardant and superhydrophobic electrospun nanofibers. *Surf. Interfaces*, 23, 101017.
54. Baddam Y., Ijaola A. O., Asmatulu E. Fabrication of flame-retardant and superhydrophobic electrospun nanofibers. *Surf. Interfaces*. 2021. Vol. 23. Art. 101017.
55. Li, A., Wang, G. Y., Zhang, J. Zhang, W., He, S., Ren, Z., Xu, J., Wang, M. Y. (2021). Preparation methods and research progress of superhydrophobic paper. *Coord. Chem. Rev.*, 449, 214207.
55. Li A., Wang G.Y., Zhang J., Zhang W., He S., Ren Z., Xu J., Wang M. Y. Preparation methods and research progress of superhydrophobic paper. *Coord. Chem. Rev.* 2021. Vol. 449. Art. 214207.
56. Gao, S., Li, H., Guan, L., Zheng, X., Lai, W., Chen, X., Zeng, L. (2021). Facile fabrication of superhydrophobic, flame-retardant and conductive cotton fabric for human motion detection. *Cellulose*, 29 (1), 1–13.
56. Gao S., Li H. Guan L., Zheng X., Lai W., Chen X., Zeng L. Facile fabrication of superhydrophobic, flame-retardant and conductive cotton fabric for human motion detection. *Cellulose*. 2021. Vol. 29 (1). P. 1–13.
57. Wang, X., Lu, Y., Zhang, Q., Wang, K., Carmalt, C. J., Parkin, I. P., Zhang, Z. (2021). Superhydrophobic and flame-retardant alginate fabrics prepared through a onestep dip-coating surface-treatment. *Cellulose*, 28 (9), 5973–5984.
57. Wang X., Lu Y., Zhang Q., Wang K., Carmalt C. J., Parkin I. P., Zhang Z. Superhydrophobic and flame-retardant alginate fabrics prepared through a onestep dip-coating surface-treatment. *Cellulose*. 2021. Vol. 28 (9). P. 5973–5984.
59. Li, Q., Zhang, S., Mahmood, K., Jin, Y., Huang, C., Huang, Z., Zhang, S., Ming, W. (2021). Fabrication of multifunctional pet fabrics with flame retardant, antibacterial and superhydrophobic properties, *Prog. Org. Coat.* 157, 106296.
59. Li Q., Zhang S., Mahmood K., Jin Y., Huang C., Huang Z., Zhang S., Ming W. Fabrication of multifunctional pet fabrics with flame retardant, antibacterial and superhydrophobic properties, *Prog. Org. Coat.* 2021. Vol. 157. Art. 106296.
60. Fu, J., Yang, F., Cheng, F., Guo, Z. (2022). Preparation of an electrically productive, flame retardant, and superhydrophobic recycle paper. *Colloid Surf. A-Physicochem. Eng. Asp.*, 642, 128671.
60. Fu J., Yang F., Cheng F., Guo Z. (2022). Preparation of an electrically productive, flameretardant, and superhydrophobic recycle paper. *Colloid Surf. A-Physicochem. Eng. Asp.* 2022. Vol. 642. Art. 128671.
61. Zhou, Q., Wu, W., Zhou, S., Xing, T., Sun, G., Chen, G. (2020). Polydopamine-induced growth of mineralized  $\gamma$ -FeOOH nanorods for construction of silk fabric with excellent superhydrophobicity, flame retardancy and UV resilience. *Chem. Eng. J.*, 382, 122988.
61. Zhou Q., Wu W., Zhou S., Xing T., Sun G., Chen G. (2020). Polydopamine-induced growth of mineralized  $\gamma$ -FeOOH nanorods for construction of silk fabric with excellent superhydrophobicity, flame retardancy and UV resilience. *Chem. Eng. J.* 2020. Vol. 382. Art. 122988.
62. Guo, W., Wang, X., Huang, J., Zhou, Y., Cai, W., Wang, J. (2020). Construction of durable flame-retardant and robust superhydrophobic coatings on cotton fabrics for water oil separation application. *Chem. Eng. J.*, 398, 125661.
62. Guo W., Wang X., Huang J., Zhou Y., Cai W., Wang J. Construction of durable flame-retardant and robust superhydrophobic coatings on cotton fabrics for water oil separation application. *Chem. Eng. J.* 2020. Vol. 398. Art. 125661.

63. Vishwakarma, A., Singh, M., Weclawski, B., Reddy, V. J., Kandola, B. K., Manik, G., Dasari, A., Chattopadhyay, S. (2022). Construction of hydrophobic fire retardant coating on cotton fabric using a layer-by-layer spray coating method. *Int. J. Biol. Macromol.*, 223, 1653–1666.
64. Liu, L., Huang, Z., Pan, Y., Wang, X., Song, L., Hu, Y. (2018). Finishing of cotton fabrics by multi-layered coatings to improve their flame retardancy and water repellency. *Cellulose*, 25, 4791–4803.
65. Gravit, M., Prusakov, V., Shcheglov, N., Kotlyarskaya, I. (2024). Fire protection of steel structures of oil and gas facilities: multilayer, removable, non-combustible covers. *Fire*, 7, 86.
66. Application 202017003447 DE, IPC B32B19/04. Textile multilayer structure made of non-combustible, textile fiber structures in combination with mixtures of intumescent substances for creating a heat and fire barrier / Casaretto R. (DE), inventor-applicant – No. DE202017003447.6U; applied for on 29.06.2017; published on 02.08.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
67. Budykina, T., Anosova, Y. (2022). Thermal resistance of fire retardant materials. *Mag. Civ. Eng.*, 112, 11213.
68. Pang, Y., Zhong, Z., Liu, H., Rao, L. (2012). Research on Fire-Resistant Fabric Properties of Basalt Fiber. *Appl. Mech. Mater.*, 217–219, 1151–1154.
69. Wang, K., Fu, C., Xu, A., Wu, M., Jia, L., Xu, W., Su, B., Xia, Z. (2022). Skin-friendly and highly fireproof fabric up to 1142 °C weaved by basalt @ polyimide yarns. *Compos. Part B. Eng.*, 246, 110238.
70. Pat. 105088794 CN, IPC D06M 15/55. Fire-Proof Basalt Fiber Cloth / Ming, H. (CN), inventor; Sichuan Aerospace Wuyuan Composite Co Ltd (CN), assignee – No. CN201510553702.7A; applied for on 02.09.2015; published on 05.11.2015. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
71. Pat. 20776895 CN, IPC A62C 8/06. Multi-Functional Basalt Fiber Fire Blanket / Xiang W. (CN), Maolin L. (CN), Xiaolong T. (CN), inventors; Sichuan Middle New Fiber Research Institute Co Ltd (CN), assignee – No. CN201820031596.5U; applied for on 09.01.2018; published on 28.08.2018. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
72. Frame, B. J., Hansen, J. G. R. (2004). Fire blocking blanket for protection of stored ammunition. Oak Ridge
63. Vishwakarma A., Singh M., Weclawski B., Reddy V.J., Kandola B.K., Manik G., Dasari A., Chattopadhyay S. Construction of hydrophobic fire retardant coating on cotton fabric using a layer-by-layer spray coating method. *Int. J. Biol. Macromol.* 2022. Vol. 223. P. 1653–1666.
64. Liu L., Huang Z., Pan Y., Wang X., Song L., Hu Y. Finishing of cotton fabrics by multi-layered coatings to improve their flame retardancy and water repellency. *Cellulose*. 2018. Vol. 25. P. 4791–4803.
65. Gravit M., Prusakov V., Shcheglov N., Kotlyarskaya I. Fire protection of steel structures of oil and gas facilities: multilayer, removable, non-combustible covers. *Fire*. 2024. № 7. Art. 86.
66. Application 202017003447 DE, IPC B32B19/04. Textile multilayer structure made of non-combustible, textile fiber structures in combination with mixtures of intumescent substances for creating a heat and fire barrier / Casaretto R. (DE), inventor-applicant – No. DE202017003447.6U; applied for on 29.06.2017; published on 02.08.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
67. Budykina T., Anosova Y. Thermal resistance of fire retardant materials. *Mag. Civ. Eng.* 2022. Vol. 112. Art. 11213.
68. Pang Y., Zhong Z., Liu H., Rao L. Research on Fire-Resistant Fabric Properties of Basalt Fiber. *Appl. Mech. Mater.* 2012. Vol. 217–221. P. 1151–1154.
69. Wang K., Fu C., Xu A., Wu M., Jia L., Xu W., Su B., Xia Z. Skin-friendly and highly fireproof fabric up to 1142 °C weaved by basalt @ polyimide yarns. *Compos. Part B. Eng.*, 2022. Vol. 246. Art. 110238.
70. Pat. 105088794 CN, IPC D06M 15/55. Fire-Proof Basalt Fiber Cloth / Ming, H. (CN), inventor; Sichuan Aerospace Wuyuan Composite Co Ltd (CN), assignee – No. CN201510553702.7A; applied for on 02.09.2015; published on 05.11.2015. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
71. Pat. 20776895 CN, IPC A62C 8/06. Multi-Functional Basalt Fiber Fire Blanket / Xiang W. (CN), Maolin L. (CN), Xiaolong T. (CN), inventors; Sichuan Middle New Fiber Research Institute Co Ltd (CN), assignee – No. CN201820031596.5U; applied for on 09.01.2018; published on 28.08.2018. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
72. Frame B. J., Hansen J. G. R. Fire blocking blanket for protection of stored ammunition. Oak Ridge

- National Laboratory. Oak Ridge, Tennessee. August 6, 2004. 23 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/237376347>.
73. Chin, W. K., Mulkern, T. J., Tewarson, A. (2000). Fire-Resistant and Fragment Penetration-Resistant Blankets for the Protection of Stored Ammunition (ARL-TR-2285, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066, September 2000). 71 p.
74. Lern, K. W., Kwon Y. D., Chin, H. B., Li, H. L., Prevorsek, D. C. (1993). Spectra composite that withstands torch flame test. *J. Fire Sciences*, 1, 147–151.
75. Saad, M. A., Airman, R. L. (1988). Thermal Protection Studies of Plastic Films and Fibrous Materials. *J. Fire Sciences*, 6, 250–259.
76. Kourtides, D. A., Pitts, W. C., Araujo, M., Zimmerman, R. S. (1988). High Temperature properties of ceramic fibers and insulations for thermal protection of atmospheric entry and hypersonic cruise vehicles. *J. Fire Sciences*, 6, 313–321.
77. Damant, G. H. (1996). Use of barriers and fire blocking layers to comply with full scale fire tests for furnishings. *J. Fire Sciences*, 14, 3–7.
78. Takahashi, F. (2021). Fire blanket and intumescent coating materials for failure resistance. *MRS Bulletin*, 46, 429–434.
79. Takahashi, F. (2019). Whole-house fire blanket protection from wildland-urban interface fires. *Front. Mech. Eng.*, 5, 60.
- Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, Tennessee, 2004. 23 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/237376347>.
73. Chin W. K., Mulkern T. J., Tewarson A. Fire-Resistant and Fragment Penetration-Resistant Blankets for the Protection of Stored Ammunition (ARL-TR-2285, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066, September 2000). 2000. 71 p.
74. Lern K. W., Kwon Y. D., Chin H. B., Li H. L., Prevorsek D. C. Spectra composite that withstands torch flame test. *J. Fire Sciences*. 1993. № 1. P. 147–151.
75. Saad M. A., Airman R. L. Thermal Protection Studies of Plastic Films and Fibrous Materials. *J. Fire Science*. 1988. Vol. 6. P. 250–259.
76. Kourtides D. A., Pitts W. C., Araujo M., Zimmerman R. S. High Temperature properties of ceramic fibers and insulations for thermal protection of atmospheric entry and hypersonic cruise vehicles. *J. Fire Sciences*. 1988. № 6. P. 313–321.
77. Damant G. H. Use of barriers and fire blocking layers to comply with full scale fire tests for furnishings. *J. Fire Science*. 1996. Vol. 14. P. 3–7.
78. Takahashi F. Fire blanket and intumescent coating materials for failure resistance. *MRS Bulletin*. 2021. Vol. 46. P. 429–434.
79. Takahashi F. Whole-house fire blanket protection from wildland-urban interface fires. *Front. Mech. Eng*. 2019. № 5. Art. 60.

**TARAN NADIYA**

Candidate of Chemical Sciences, Senior researcher,  
Department of Nucleophilic Reactions Research,  
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic  
and Coal Chemistry of the National Academy  
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-1043-5596>  
Scopus Author ID: 15119449100  
E-mail: [nadegda5.09.2017@gmail.com](mailto:nadegda5.09.2017@gmail.com)

**VAKHITOV RAMIL**

Postgraduate, Department of Chemical  
Technology and Resource Conservation,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-9657-5743>  
Researcher ID: rid30607  
E-mail: [vahitov89@gmail.com](mailto:vahitov89@gmail.com)

**SHOLOGON VIKTOR**

Candidate of Chemical Sciences,  
Department of Nucleophilic Reactions Research,  
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic  
and Coal Chemistry of the National Academy  
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-6249-5390>  
Scopus Author ID: 6507045182  
E-mail: [Shologon@nas.gov.ua](mailto:Shologon@nas.gov.ua)

**RAYENKO GENNADIY**

Candidate of Chemical Sciences, Senior researcher,  
Deputy Director for Scientific Work,  
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic  
and Coal Chemistry of the National Academy  
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3694-536X>  
Scopus Author ID: 7801436067  
E-mail: [rayenko@nas.gov.ua](mailto:rayenko@nas.gov.ua)

**KALAFAT KOSTIANTIN**

Candidate of Technical Sciences, Researcher  
Department of Nucleophilic Reactions Research  
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal  
Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-6165-0005>  
Scopus Author ID: 5719302971  
E-mail: [kalafat@nas.gov.ua](mailto:kalafat@nas.gov.ua)

**BESSARABOV VOLODYMYR**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Department of Nucleophilic Reactions Research,  
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic  
and Coal Chemistry of the National Academy  
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine;  
Department of Industrial Pharmacy, Kyiv National  
University of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-0637-1729>  
Scopus Author ID: 36917184700  
Researcher ID: D-3425-2017;  
E-mail: [v.bessarabov@kyivpharma.eu](mailto:v.bessarabov@kyivpharma.eu)

**<sup>1</sup>TARAN N. A., <sup>1</sup>SHOLOHON V. I., <sup>2</sup>VAKHITOV R. A.,**

**<sup>1</sup>RAYENKO G. F., <sup>1</sup>KALAFAT K. V., <sup>1,2</sup>BESSARABOV V. I.**

<sup>1</sup> L.M. Lytvynenko Institute of Physical and Organic Chemistry and Coal Chemistry  
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**DEVELOPMENT OF MOBILE FIRE PROTECTION MEANS –  
ROLL FIRE PROTECTION MATERIALS. LITERATURE REVIEW**

**Purpose.** Determination of modern trends in the improvement of fire protection roll materials aimed at increasing their fire resistance, mechanical strength and environmental safety, to find innovative technical solutions for the development of mobile fire protection equipment.

**Methodology.** The methods of literature-system and critical analysis, the method of summarising the results from different sources to create a holistic picture of the state of the scientific problem, the method of comparative analysis of different approaches used in research on the topic of the review were used.

**Findings.** It is shown that one of the current trends in the development of the fire protection industry is the creation and organisation of mobile fire protection, which can be used for fire protection of ammunition storage sites in the field. The scientific papers and practical implementations of various types of fire protection roll materials - fire protection blankets, flexible products with intumescent coating or heat-resistant filling, etc. are considered. It is substantiated that reinforcement of fire retardant blankets is an important process that contributes to the improvement of mechanical properties and efficiency of the fire protection means. The existing methods of obtaining fibres and textile materials with reduced flammability used in the manufacture of fire protection roll materials are analysed. It is shown that an effective means that combines the best qualities of constructive and intumescent fire protection is the use of flexible swellable fire protection materials. The patent information, formulations and manufacturing technologies for mobile intumescent fire protection means are analysed.

**Originality.** For the first time, on the basis of an array of literature data and patent search, the analysis and generalisation of literature data on the composition, technological aspects of manufacturing, characteristics of fire protection efficiency of flexible fire protection products as a component of mobile fire protection in the field to ensure long-term operation without loss of protective properties was carried out.

**Practical value.** Practical recommendations on the composition, effect of innovative fire retardant additives and nanomaterials, and manufacturing technology of fire retardant roll materials that can be used for fire protection of defence, construction and industrial facilities have been provided.

**Keywords:** structural fire protection; roll fire protection materials; fire protection blankets; intumescent materials.