

УДК 025.171:002.53:004.942

DOI: 10.20535/2077-7264.2(88).2025.327117

© М. В. Якимець, асп., І. З. Миклушка, канд. техн. наук.,
доц., Інститут поліграфії та медійних технологій
НУ «Львівська політехніка» Львів, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДУ ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХНІ СТАРОДРУКІВ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ

У статті розглянуто задачу вибору оптимального методу очищення поверхні стародруків, які є об'єктами національної та світової культурної спадщини. Запропоновано формалізувати вибір методу очищення за допомогою методу аналізу ієрархій (MAI), що дозволяє здійснювати багатокритеріальну оцінку альтернатив з урахуванням складності забруднень та ефективності методів очищення.

Ключові слова: стародруки; очищення; реставрація; метод аналізу ієрархій; ієрархічна модель; метод Сааті; збереження стародруків.

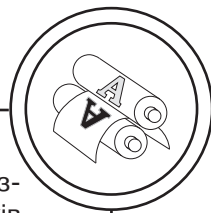
Постановка проблеми

У збереженні друкованої культурної спадщини особливе місце займають стародруки — унікальні книжкові видання XVI–XIX століть, які зберігаються в архівах, бібліотеках, музеях та приватних колекціях. Проте значна частина цих документів зазнала впливу різних видів забруднень: від пилу, сажі та бруду до біологічного ураження грибами, пліснявою та мікроорганізмами. Ці чинники не лише ускладнюють читання тексту, а й сприяють подальшій деградації матеріалу основи, тобто паперу [1, 2].

Одним із ключових етапів у процесі реставрації стародруків є очищення поверхні, яке потребує особливої точності й обережності. Вибір технології очищення має вра-

ховувати характер забруднення, фізико-хімічні властивості паперу, ступінь зношеності, наявність графічних елементів, тип барвника та низку інших чинників. У практиці реставраційних центрів використовують механічні, хімічні, біологічні, вологі та лазерні методи очищення. Проте їх ефективність значно варіюється залежно від конкретної ситуації [3–5].

Складність полягає в тому, що для кожного випадку потрібно враховувати низку суперечливих критеріїв, які впливають на доцільність того чи іншого методу. У зв'язку з цим постає необхідність систематизованого підходу до прийняття рішень щодо вибору оптимального методу очищення поверхні стародруків, що враховує всі значущі чинники. Одним із ефек-



тивних інструментів вирішення таких задач є метод аналізу ієрархій (MAI), який дозволяє здійснити багатокритеріальний аналіз та обґрунтовано оцінити пріоритетність альтернатив [6, 7].

Аналіз попередніх досліджень

Методи очищення стародруків є предметом досліджень багатьох науковців у сфері консервації, реставрації та матеріалознавства. У сучасній практиці широко використовуються традиційні механічні способи видалення поверхневих забруднень за допомогою м'яких щіток, гумок, гелеподібних носіїв. Хімічне очищення включає використання розчинників і хелаторів, але пов'язане з ризиком пошкодження барвників та волокон паперу [2].

Біологічні методи ґрунтуються на використанні ферментів або мікроорганізмів, які вибірково руйнують певні види забруднень. Вологе очищення застосовується переважно для знебарвлення плям або усунення розчинних солей, але потребує суворого контролю за вологою, щоб уникнути деформації матеріалу. Лазерне очищення, що розвивається з 1990-х років, показало високу ефективність для точкового та селективного видалення нашарувань без фізичного контакту з поверхнею [1].

У дослідженнях Fotakis C., Anglos D., Zafiropoulos V., Georgiou S., Tornari V [8], і Льода Л., Дзендзелюк Л. [2] проаналізовано фізичні процеси взаємодії очищувальних технологій із паперовою основою, розглянуто ризики пошкодження матеріалу та сформу-

льовано рекомендації щодо безпечного очищення стародруків залежно від типу забруднення.

Таким чином, у літературі представлено широкий спектр технічних підходів, але не вистачає системного порівняльного аналізу ефективності методів залежно від типу забруднення. MAI, запропонований Томасом Сааті [6], дає змогу формалізувати вибір, що ґрунтується на експертних оцінках, і забезпечити об'єктивну оцінку альтернатив. Його використання у сфері реставрації стародруків поки залишається недостатньо дослідженим і має значний потенціал [7].

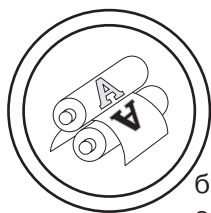
Мета роботи

Розробка ієрархічної моделі прийняття рішень для вибору оптимального методу очищення аркушів стародруків залежно від типу забруднення, з розрахунком пріоритетів методів очищення відповідно до складності забруднень, що дозволяє оптимізувати реставраційні процеси та мінімізувати ризики пошкодження історичних документів.

Результати проведених досліджень

Для обґрунтування вибору оптимального методу очищення поверхонь стародруків використано MAI [6]. Цей метод дозволяє приймати рішення в умовах багатокритеріальності, формалізуючи оцінку складних альтернатив шляхом побудови ієрархічної структури, проведення попарних порівнянь і обчислення пріоритетів.

У моделі враховано релевантні зв'язки між методами очистки та типами забруднень. Наприклад,



біологічні методи застосовуються лише для уражень грибком, та комплексних забруднень. А механічне очищення — лише для поверхневих сухих, комплексних та технологічних забруднень, згідно з описом та протоколами реставраційних методів очищення аркушів стародруків [2–5] (рис.).

Для кожного типу забруднення сформовано матрицю попарних порівнянь критеріїв другого рівня ієрархічної моделі прийняття рішень щодо вибору методу очищення поверхні стародруків (типів забруднень), яка сформована на основі експертного оцінювання відповідно до фундаментальної шкали Сааті [6]. Оцінювання здійснювали п'ять фахівців, які працюють у Відділі реставрації та консервації рідкісних видань Львівської національної наукової бібліотеки України імені В. Стефаника та мають багаторічний досвід практичного застосування різних методів очищення стародруків. Цифрові значення в таблиці відображають експертне уявлення про відносну склад-

ність видалення кожного типу забруднення: чим важче видалити забруднення, тим вища його пріоритетність у моделі.

Розрахунок векторів пріоритетів проводився за загальноприйнятою методикою МАІ згідно формули (1)

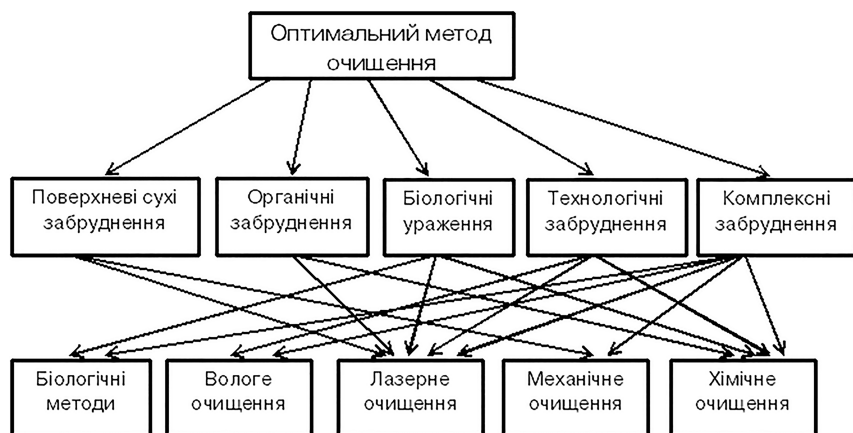
$$\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}, \quad (1)$$

де a_{ij} — елемент матриці попарного порівняння, ω_i — вага альтернативи i .

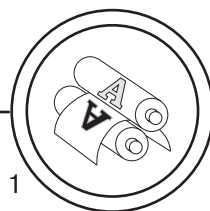
Фінальні ваги методів очищення, отримані шляхом зваженого агрегування локальних пріоритетів методів за кожним типом забруднення з урахуванням глобальної ваги для цього типу розраховані за формулою (2)

$$P_m = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot p_{im}, \quad (2)$$

де P_m — загальна пріоритетність методу, ω_i — вага типу забруднення i , p_{im} — локальний пріоритет методу m при типі i .



Ієрархічна модель прийняття рішень щодо вибору методу очищення поверхні стародруків



Таблиця 1

Матриця попарних порівнянь методів очищення

Тип забруднення	Сухі	Органічні	Біологічні	Технологічні	Комплексні
Сухі	1	1/2	1/3	1/4	1/5
Органічні	2	1	1/2	1/3	1/4
Біологічні	3	2	1	1/2	1/3
Технологічні	4	3	2	1	1/2
Комплексні	5	4	3	2	1

Результати попарних порівнянь та обчислення ваг критеріїв

Для побудови ієрархічної моделі прийняття рішень щодо вибору методу очищення поверхні стародруків проведено експертне попарне порівняння критеріїв другого рівня (типів забруднень) за критерієм складності видалення [6].

Елементи матриці попарних порівнянь (табл. 1) заповнюються на основі фундаментальної шкали Сааті (1–9), що відображає відносну перевагу одного типу забруднення над іншим відповідно до експертних оцінок фахівців відділу реставрації та консервації рідкісних видань Львівської національної наукової бібліотеки України імені В. Стефаника. Чим більша складність видалення певного типу забруднення, тим вищий пріоритет [7].

Для кожного елемента матриці обчислюється нормалізоване значення за формулою (3)

$$a_{ij}^* = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{ik}}. \quad (3)$$

Після обчислення елементів матриці для кожного критерію розраховується за формулою (4) середнє значення елементів по рядку — це буде вага критерію

$$\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij}^*. \quad (4)$$

Отримані результати свідчать про те, що найскладнішими для видалення є комплексні забруднення (табл. 2), які поєднують кілька типів домішок, часто нашаровані і глибоко проникають в структуру паперу. Найменшу

Таблиця 2

Складність видалення різних типів забруднень

Тип забруднення	Вага (складність видалення)
Поверхневі сухі забруднення	0.0624
Органічні плями	0.0986
Біологічні ураження	0.1611
Технологічні забруднення	0.2618
Комплексні забруднення	0.4162



складність становлять поверхневі сухі забруднення, які найчастіше видаляються безконтактно або механічно.

Після визначення ваг критеріїв типів забруднень будуються локальні матриці попарних порівнянь для кожного з методів очищення (табл. 3–7), які застосовуються для визначеного виду забруднень (рис.). Цей процес дозволяє оцінити відносну ефективність альтернативних методів у межах кожної конкретної ситуації з певним забрудненням [9].

Кожна матриця дозволяє порівняти методи очищення один з одним попарно, виходячи з експертного уявлення про те, наскільки один метод є ефективнішим за інший у контексті певного типу забруднення (наприклад, жирова пляма або грибкове ураження). Оцінки надаються за фундаментальною шкалою Сааті [7, 10].

Процедура побудови матриці полягає у виділенні релевантного методу очищення для кожного типу забруднення (наприклад,

біологічні методи не порівнюються в контексті сухих забруднень). Створюється квадратна матриця $n \times n$, де n — кількість альтернатив. У кожну клітинку a_{ij} вноситься значення, що відображає, наскільки метод i ефективніший за метод j . Діагональні елементи $a_{ii} = 1$, а

$$a_{ji} = 1/a_{ij}. \text{ Матриця нормалізується}$$

за стовпцями, після чого розраховується вектор локальних ваг — середнє значення по рядках нормалізованої матриці, за формулою (5) [7].

$$\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}. \quad (5)$$

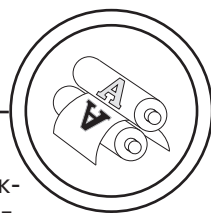
Таким чином, для кожного типу забруднення ми отримуємо свою локальну матрицю, що дозволяє надалі провести агрегування ваг з урахуванням важливості типів забруднень. Для цього за результатами таблиць 3–7 будується матриця нормалізованих ваг (табл. 8) шляхом розрахунку се-

Таблиця 3
Локальна матриця для поверхневих сухих забруднень

Метод очищення	Лазерне очищення	Механічне очищення	Середнє геометричне	Норм. середнє геометр.
Лазерне очищення	1.0	5.0	2.2361	0.8333
Механічне очищення	0.2	1.0	0.4472	0.1667

Таблиця 4
Локальна матриця для органічних плям

Метод очищення	Лазерне очищення	Хімічне очищення	Середнє геометричне	Норм. середнє геометр.
Лазерне очищення	1.0	5.0	2.2361	0.8333
Хімічне очищення	0.2	1.0	0.4472	0.1667



редніх геометричних значень для кожного методу очищення в межах локальних матриць попарних порівнянь, отриманих для кожного типу забруднення, з подальшою їх нормалізацією та форму-

ється загальний рейтинг ефективності методів очищення (табл. 9) шляхом агрегування нормалізованих локальних ваг методів очищення, помножених на відповідні ваги важливості типів заб-

Таблиця 5

Локальна матриця для біологічних уражень

Метод очищення	Біологічні методи	Лазерне очищення	Хімічне очищення	Середнє геометричне	Норм. середнє геометр.
Біологічні методи	1.0	5.0	3.0	2.4662	0.6571
Лазерне очищення	0.2	1.0	2.0	0.7368	0.1963
Хімічне очищення	0.3333	0.5	1.0	0.5503	0.1466

Таблиця 6

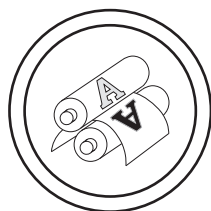
Локальна матриця для технологічних забруднень

Метод очищення	Вологе очищення	Лазерне очищення	Механічне очищення	Хімічне очищення	Середнє геометричне	Норм. середнє геометр.
Вологе очищення	1.0	5.0	3.0	7.0	3.2011	0.5774
Лазерне очищення	0.2	1.0	2.0	5.0	1.1892	0.2145
Механічне очищення	0.3333	0.5	1.0	3.0	0.8409	0.1517
Хімічне очищення	0.1429	0.2	0.3333	1.0	0.3124	0.0564

Таблиця 7

Локальна матриця для комплексних забруднень

Метод очищення	Лазерне	Механічне	Хімічне	Біологічні методи	Вологе	Середнє геометричне	Норм. середнє геометр.
Лазерне очищення	1.0	5.0	3.0	7.0	9.0	3.9363	0.5182
Механічне очищення	0.2	1.0	2.0	5.0	7.0	1.6952	0.2232
Хімічне очищення	0.3333	0.5	1.0	3.0	6.0	1.2457	0.164
Біологічні методи	0.1429	0.2	0.3333	1.0	2.0	0.4529	0.0596
Вологе очищення	0.1111	0.1429	0.1667	0.5	1.0	0.2656	0.035



Таблиця 8

Матриця нормалізованих ваг

Тип забруднення	Біологічні методи	Вологе очищення	Лазерне очищення	Механічне очищення	Хімічне очищення
Поверхневі сухі забруднення	0.0	0.0	0.8333	0.1667	0.0
Органічні плями	0.0	0.0	0.8333	0.0	0.1667
Біологічні ураження	0.6571	0.0	0.1963	0.0	0.1466
Технологічні забруднення	0.0	0.5774	0.2145	0.1517	0.0564
Комплексні забруднення	0.0596	0.035	0.5182	0.2232	0.164

руднень, отримані з матриці парних порівнянь на другому рівні ієрархії, відповідно до принципів методу аналізу ієрархій.

Аналіз нормалізованих ваг показав, що лазерне очищення є найефективнішим методом для більшості типів забруднень, зокрема для поверхневих сухих, органічних плям і комплексних забруднень. Біологічні методи виявилися найбільш пріоритетними лише для випадків біологічного ураження, а вологе очищення отримало високі оцінки при технологічних забрудненнях.

Згідно з агрегованими результатами (табл. 9), лазерне очищення має найвищу загальну пріори-

тетність (0.4376) серед усіх розглянутих альтернатив, що свідчить про його універсальність та ефективність при очищенні аркушів стародруків. Інші методи, такі як вологе та механічне очищення, мають суттєво нижчі оцінки, тоді як хімічне очищення посідає останню позицію.

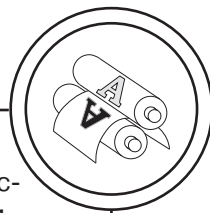
Висновки

У межах дослідження побудовано ієрархічну модель прийняття рішень щодо вибору методу очищення поверхні стародруків на основі MAI. Запропонована трирівнева структура враховує п'ять основних типів забруднень, характерних для па-

Таблиця 9

Загальний рейтинг методів очищення аркушів стародруків (вектор результатів)

Метод очищення	Загальна пріоритетність
Лазерне очищення	0.4376
Вологе очищення	0.1657
Механічне очищення	0.143
Біологічні методи	0.1307
Хімічне очищення	0.1231



перових артефактів, а також найбільш поширені методи очищення.

Для кожного типу забруднення сформовано матриці попарних порівнянь методів очищення, отримано локальні пріоритети за допомогою середнього геометричного, та здійснено агрегування результатів з урахуванням складності видалення кожного типу забруднень. Такий підхід дозволив об'єктивно оцінити ефективність методів очищення у багатокритеріальному контексті:

— *Лазерне очищення* виявилося найефективнішим методом загалом (пріоритетність 43,8 %), з огляду на його універсальність та ефективність у більшості типів

забруднень, включно з комплексними і біологічними ураженнями.

— *Вологе очищення* (16,6 %) і *механічне очищення* (14,3 %) виявилися ефективними переважно при технологічних або поверхневих забрудненнях.

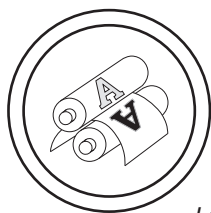
— *Біологічні методи* (13,1 %) мають вузьке, але важливе застосування в очищенні від грибкових та мікробіологічних уражень.

— *Хімічне очищення* (12,3 %) показало нижчу пріоритетність, зважаючи на обмеження у застосуванні та потенційні ризики для паперової основи.

MAI продемонстрував свою ефективність як інструмент для прийняття обґрунтованих рішень у реставраційній діяльності.

Список використаної літератури/References

1. Zekou, E., Tsilikas, I., Chatzitheodoridis, E., & Serafetinides, A. A. (2017). Laser paper cleaning: the method of cleaning historical books. *Proc. of SPIE*, 10233, 102330G. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/312079183_Laser_paper_cleaning_the_method_of_cleaning_historical_books [in English].
2. Loda, L., & Dzendzeliuk, L. (2022). Entomologichne tlo knyhoskhovyshch: urazhennia, metody borotby (za doslidzhenniam fondu Lvivskoi natsionalnoi naukovoï biblioteki Ukrainy imeni V. Stefanyka) [Entomological background of book depositories: infestation, control methods (based on the collection of the V. Stefanyk Lviv National Scientific Library of Ukraine)]. *Notes of the V. Stefanyk Lviv National Scientific Library of Ukraine*, 14(30), 230–243. DOI: [https://doi.org/10.37222/2524-0315-2022-14\(30\)-8](https://doi.org/10.37222/2524-0315-2022-14(30)-8) [in Ukrainian].
3. (2001). *Dry Methods for Surface Cleaning Paper*. Canadian Conservation Institute. Ottawa: Department of Canadian Heritage, 12 p. Retrieved from https://publications.gc.ca/collections/collection_2016/pch/NM95-55-11-2001-eng.pdf [in English].
4. *BPG Surface Cleaning*. American Institute for Conservation (AIC). AIC Wiki, [n.d.]. Retrieved from https://www.conservation-wiki.com/wiki/BPG_Surface_Cleaning [in English].
5. *BPG Washing*. American Institute for Conservation (AIC). AIC Wiki, [n.d.]. Retrieved from https://www.conservation-wiki.com/wiki/BPG_Washing [in English].
6. Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). *Models, methods, concepts and applications of the analytic hierarchy process*. Berlin: Springer, 346 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6> [in English].
7. Senkivskyi, V. M., Kudriashova, A. V., & Kozak, R. O. (2022). *Informatsiina tekhnolohiia formuvannia yakosti redaktsiino-vydavnychoho protsesu* [Information technology for quality formation in the editorial and publishing process]. Lviv: Ukrainian Academy of Printing, 272 p. [in Ukrainian].



8. Fotakis, C., Anglos, D., Zafiropulos, V., Georgiou, S., & Tornari, V. (2006). *Lasers in the Preservation of Cultural Heritage: Principles and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 364 p. [in English].

9. *Conservation Services Notes: Surface Cleaning*. Missouri State Archives. Jefferson City, MO: Missouri Secretary of State, [n.d.]. Retrieved from <https://www.sos.mo.gov/archives/localrecs/conservation/notes/surfacecleaning.asp> [in English].

10. Gupta, A. (29 January 2019). *Inside a Paper Conservator's Toolkit*. American Philosophical Society. Retrieved from <https://www.amphilsoc.org/blog/inside-paper-conservators-toolkit> ([in English]).

This study presents a hierarchical model for selecting the optimal cleaning method for early printed books using the Analytic Hierarchy Process (AHP). Five contamination types and five cleaning methods were evaluated based on expert input. Pairwise comparison matrices were used to calculate local and global priority weights. Laser cleaning demonstrated the highest overall effectiveness (43.8 %), particularly for complex and biological contaminants. The proposed model reduces subjectivity and supports systematic decision-making in heritage preservation.

Keywords: early printed books; paper cleaning; restoration; Analytic Hierarchy Process; hierarchical model; conservation methods; laser cleaning.

Надійшла до редакції: 18.04.25

Рецензія: 01.05.25

Опубліковано: 30.06.25