

**ПРОЄКТУВАННЯ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ УЛЬТРАФІОЛЕТОМ
З ОПТИМІЗАЦІЄЮ ДОЗУВАННЯ ОПРОМІНЕННЯ ЗАСОБАМИ
ВИМІРЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ УФ-ВИПРОМІНЕННЯ**

Вступ

Умови сьогодення для ведення будь-якого виробництва продукції тісно пов'язані з використанням хімічних або синтезовано отриманих ферментів. Даний напрям розвитку господарства хвилює не тільки споживачів але й всі цивілізовані країни. Основну увагу зосереджено на бджільництві, галузі, яка страждає найбільше від хімії, що застосовують фермерські господарства. Бджільництво також тісно пов'язане з застосуванням ферментів та препаратів для захисту та знезараження. Ефективність захисту бджіл як елемента екосистеми в майбутньому полягає в розробці та впровадженні електрофізичних методів. Зокрема, як альтернатива розглядаються методи опромінення та знезараження.

Україна традиційно входить до п'ятірки лідерів у світі за кількістю бджолосімей та виробництва меду. Але в останнє десятиліття зафіксовано масові втрати бджіл – у деяких регіонах щорічно зникає до 30–50 % бджолосімей. Цей процес має як локальні, так і глобальні причини [1, 2].

Скорочення чисельності бджолосімей в Україні є серйозною екологічною та аграрною проблемою. Цей процес має комплексний характер і зумовлений низкою взаємопов'язаних чинників.

Однією з головних причин є отруєння бджіл пестицидами, особливо неонікотиноїдами, які широко застосовуються в сільському господарстві. Часто аграрії обробляють поля інсектицидами в період цвітіння медоносних культур, не попереджаючи пасічників. Це призводить до масової загибелі бджіл після контакту з отруєним пилком або нектаром.

Не менш небезпечною є поширеність хвороб і паразитів, зокрема вароатозу, що викликається кліщем *Varroa destructor*. Цей паразит послаблює імунітет бджіл і сприяє розвитку вірусних, бактеріальних та грибкових інфекцій. Також загрозу становлять хвороби розплоду, такі як американський і європейський гнилець, а також грибкові ураження – аспергільоз і аскомікоз.

Ще один чинник – зміна клімату: нестабільна зима з різкими перепадами температур, ранні відлиги або затяжні дощі негативно впливають на стан бджолосімей. Такі погодні умови сприяють підвищенню вологості у вуликах, що створює сприятливі умови для розвитку грибкових інфекцій.

Зменшення природної кормової бази також значно впливає на виживання бджіл. Масове вирощування монокультур, вирубка лісосмуг, знищення дикорослих медоносів та розширення урбанізованих територій призводять до дефіциту нектару та пилку. У результаті бджолам не вистачає ресурсів для розвитку сім'ї та підготовки до зими [3].

Важливим аспектом є також людський фактор і недоліки в організації бджільництва. Відсутність належного ветеринарного контролю, брак досвіду у нових пасічників, недосконалість законодавства у сфері захисту бджіл і недостатня комунікація між аграріями та бджолярами створюють додаткові ризики для пасік.

Статистичні дані (2020–2024)

Рік	Орієнтовна кількість бджолосімей, млн	Втрати (за оцінками пасічників)
2020	~3,5	до 25 %
2021	~3,2	до 30 %
2022	~2,9	понад 35 % (особливо на сході)
2023	~2,8	до 50 % в окремих регіонах
2024	~2,6	тенденція до скорочення зберігається

Отже, скорочення бджолосімей в Україні спричинене поєднанням хімічного, біологічного, кліматичного та соціального впливів. Для збереження популяції бджіл необхідні комплексні заходи: обмеження використання шкідливих агрохімікатів, посилення ветеринарного контролю, підтримка пасічників і розвиток екологічно сталого землеробства.

У зв'язку зі зростаючими загрозами для бджільництва особливої актуальності набуває пошук нових, екологічно безпечних підходів до профілактики та захисту бджолосімей. Одним із перспективних напрямів є використання ультрафіолетового (УФ) випромінювання, яке має виражену бактерицидну дію.

Мета роботи – дослідити ефективність використання УФ-опромінювання як механізму боротьби з грибковими та вірусними захворюваннями поверхні вулика.

Аналіз попередніх досліджень та літературних джерел

Пошук та альтернатива сучасним методам полягає в реалізації електротехнологій в бджільництві, які є більш ефективними для застосування. Використання УФ-опромінювання є методом, який уособлює високу ефективність та в той же час простоту використання.

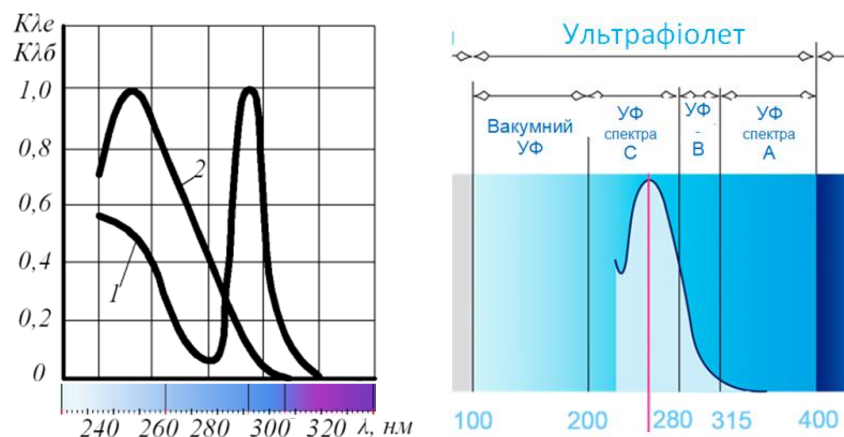


Рис. 1. Спектр дії УФ-випромінювання: 1 – спектр еритемної дії УФ-випромінювання; 2 – спектр бактерицидної дії УФ-випромінювання

Застосування УФ-випромінювання у діапазоні довжин хвиль до 300 нм, відоме як UVC-діапазон, належить до так званого агресивного або бактерицидного спектру (рис. 1). Саме цей вузький спектр має виражену фотохімічну активність, яка дає змогу ефективно знищувати широкий спектр патогенних мікроорганізмів – включаючи бактерії, віруси, грибки та їхні спори. Основним механізмом дії UVC-випромінювання є руйнування нуклеїнових кислот – ДНК і РНК. УФ-промені поглинаються азотистими основами ДНК, зокрема тиміном, що призводить до утворення тимінових димерів, які перешкоджають реплікації й транскрипції. Внаслідок цього мікроорганізм втрачає здатність до розмноження і гине [4].

Оскільки UVC-випромінювання не залишає хімічних залишків і не утворює побічних токсичних продуктів, воно набуває дедалі більшого поширення як альтернатива традиційним дезінфекційним засобам. Застосування УФ-опромінювання є особливо актуальним у сферах, де

критично важливо забезпечити високий ступінь стерильності при мінімальному втручанні у фізико-хімічні властивості матеріалів чи біоб'єктів.

Зокрема, у ветеринарії та бджільництві ультрафіолет використовується для знезараження вуликів, рамок, інвентарю та поверхонь, заражених патогенними мікроорганізмами, включаючи спори грибів (*Ascosphaera apis*, *Aspergillus spp.*, *Candida spp.*), що є збудниками небезпечних захворювань розплоду. УФ-опромінення дозволяє ефективно пригнічувати розвиток хвороб без застосування агресивних дезінфектантів, які можуть вплинути на якість меду чи здоров'я бджолосімей.

В аграрній техніці УФ використовується для стерилізації насіння, обробки тари, пакувальних матеріалів, систем зберігання продуктів. У медицині UVC-промені застосовуються в знезаражувальних камерах, операційних, лабораторіях, вентиляційних системах та поверхневій обробці інструментів і приміщень.

Універсальність UVC-опромінення, його миттєва дія, простота застосування та відсутність хімічних реагентів дозволяють вважати його одним із найперспективніших засобів безконтактного знезараження, особливо в умовах підвищеної біологічної небезпеки або стійкості патогенів до традиційних антисептиків [4].

Для кількісного оцінювання ефективності УФ-обробки використовується поняття дози, потужності опромінення, щільність опромінення, порогова доза, яка розраховується за формулами:

$$D = E \times t, \quad (1)$$

D – доза опромінення ($\text{Дж}/\text{см}^2$); E – потужність випромінювання (інтенсивність), $\text{Вт}/\text{см}^2$; t – час опромінення, с.

Потужність випромінювання УФ-С:

$$P_{el} \approx \frac{P_A}{\eta_{UVC} k_{meop}}; \quad (2)$$

В дослідженнях національного університету біоресурсів і природокористування (2022) підтверджено, що застосування УФ-С ламп для періодичного знезараження вуликів призводить до зниження рецидиву грибкових інфекцій на 70 % у порівнянні з традиційними методами обробки (пар, оцтова кислота). Метод виявився ефективним у міжсезонний період.

Реалізація застосування УФ-опромінювача в пасічному господарстві та практична реалізація

Для аналізу та переконання в практичній ефективності дії опромінюючої установки було виготовлено макет дослідного зразка. Установка має енергоефективну конструкцію, яка складається з УФ-опромінювача бактерицидного діапазону, гілки живлення у вигляді компактно автономної сонячної установки, а також однофазного реле часу, що забезпечує контроль тривалості опромінення (рис. 2).

Така конфігурація дозволяє здійснювати санітарну обробку вуликів або елементів пасічного обладнання без прив'язки до стаціонарної електромережі, що є критично важливим для використання в польових умовах [5, 6].

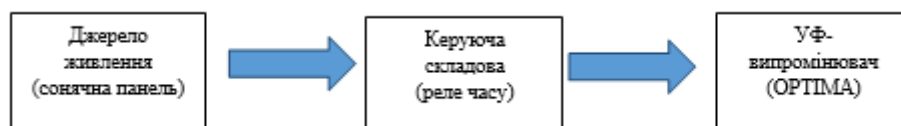


Рис. 2. Схема установки знезараження на базі УФ-опромінювача

Дана установка базується на використанні агресивних хвиль. Порогова біодоза для бджоли становить $25 \text{ МВт}\cdot\text{с}\cdot\text{см}^2$ ($250 \text{ Дж}/\text{м}^2$), а при повторному опроміненні – $45 \text{ МВт}\cdot\text{с}\cdot\text{см}^2$. На практиці зазвичай застосовують $0,125$ – $0,667$ біодози, при перевищенні якої бджола, кліщ або інший біоорганізм не виживають. Волосковий покрив бджоли зменшує інтенсивність

УФ-променів на 12,5–15 %. Дозування ускладнюється індивідуальними особливостями бджіл і кліщів: породою, віком, фізичним станом, кольором та хітиновим покриттям.

Діапазон застосування до 300 нм. Даний світильник забезпечує якісне виконання функції знезараження в бактерицидному спектрі. Основою теорії дослідження слугують дослідження (наприклад, Інституту ветеринарної медицини НААН), опромінення ультрафіолетом з довжиною хвилі 254 нм. Дослідження обрання правильної довжини хвилі – запорука якісної обробки пасічного інвентарю та елементів вулика.



Рис. 3. Світильник з лампою УФ

Відповідно до мети роботи проведено експериментальні дослідження для оцінки ефективності УФ-С випромінювання (254 нм) у знезараженні дерев'яних елементів вулика, інфікованих грибковими та вірусними патогенами, шляхом порівняння ступеня зниження інфекційного навантаження при різній тривалості опромінення [6, 7].

Для дослідження ефективності знезараження використовували дерев'яні вулики 0,6 x 0,5 м, інокульовані спорами. Як джерело опромінення застосовували УФ-випромінювач (рис. 3) з довжинами хвиль 210, 222, 254, 265 та 280 нм. Тривалість опромінення становила 10 хв при фіксованій інтенсивності випромінювання $E = 0,4 \text{ Вт} / \text{м}^2$. Відстань від джерела випромінювання до поверхні зразків – 50 см. Ефективність оцінювалась шляхом підрахунку колонієутворюючих одиниць (CFU) та визначення відсотка їх зниження порівняно з контрольним зразком, що не піддавався опроміненню.

Для забезпечення точності та повторюваності експерименту використано контрольно-вимірні прилади, що дозволяють фіксувати основні параметри УФ-опромінення та контролювати умови знезараження [8]:

- люксометр/радіометр УФ-діапазону (UVC): застосовувався для визначення інтенсивності випромінювання у заданій точці експозиції. Прилад був відкалібрований на довжину хвилі 254 нм і забезпечував вимірювання у межах 0,1–10 мВт/см² з точністю $\pm 5 \%$;
- таймер-реле: використовувався для точного дозування часу опромінення. Пристрій забезпечував стабільну тривалість експозиції з похибкою не більше ± 1 с на кожні 10 хв роботи. Це дозволяло виключити людський фактор при регулюванні тривалості впливу;
- термометр цифровий: контролював температуру в зоні опромінення для запобігання впливу теплового чинника на результати експерименту. Температурні коливання не перевищували ± 1 °С;
- лабораторна установка з опромінювачем містила змінні джерела УФ-випромінювання з можливістю швидкої заміни ламп різної довжини хвилі. Конструкція забезпечувала сталу відстань 50 см між джерелом випромінювання і зразком.

Застосування наведених приладів забезпечило надійний контроль за основними параметрами опромінення та точну інтерпретацію експериментальних результатів. Контрольні вимірювання проводилися перед кожною серією опромінення для верифікації стабільності випромінювача та відтворюваності умов досліду [9].

Результати експерименту зведено у табл. 2.

Таблиця 2

Результати експерименту

Довжина хвилі (нм)	Кількість колоній CFU після опромінення	Ефективність знезараження, %
210	80	68
222	50	80
254	8	96,8
265	12	94,4
280	45	82
Контроль (0 хв)	250	0

Для якісного аналізу виконання знезараження запропоновано проведення знезараження пасічного інвентарю за різними діапазоном випромінювання та часом обробки у відповідності до формули розрахунку потужності випромінювання (1), рис. 4.

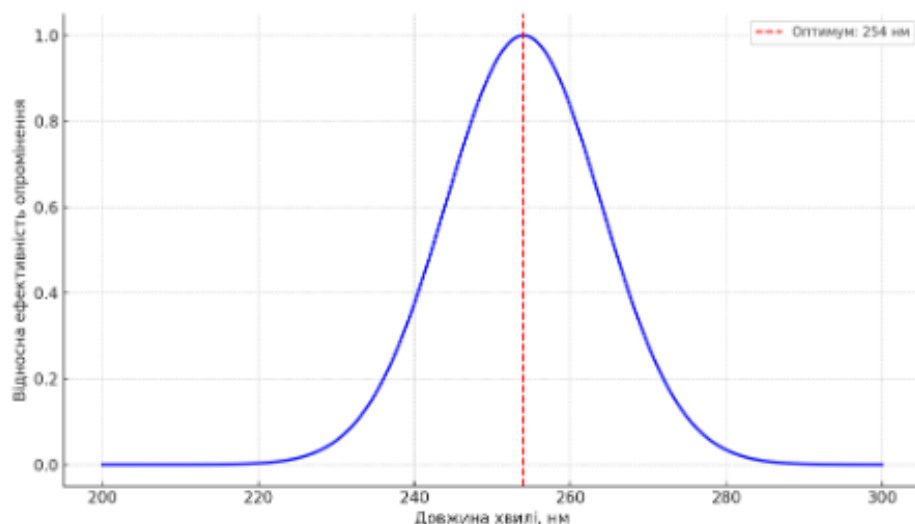


Рис. 4. Графік експериментальних даних за ефективністю знезараження від довжини хвилі УФ-випромінювання

З рис. 4 видно, що оптимальна довжина хвилі становить 254 нм, при якій спостерігається максимальна ефективність – саме в цьому діапазоні УФ-С випромінювання найкраще деструкує ДНК мікроорганізмів (спори, грибки, бактерії), але визначено, що діапазон за часом для ефективної обробки повинен сягати 12,5 хв [8, 9]. Хоча дана система показала себе якісно як метод для заміни стандартних методів обробки інвентарю в пасічному господарстві, але дана система знезараження якісно бореться з найпростішими, при цьому використання унеможливується там, де є бджоли. Агресивне випромінювання може руйнувати зорову активність комах, що деструктує їх орієнтацію в просторі з можливістю повернення до норми або цілковитою втратою та може знищити колонію або особину повністю. Недоліком є потреба в переселенні колонії в новий вулик при потребі обробки.

Для розуміння правильності застосування методу проведено комплексний економічний аналіз методів в табл. 3, що дає змогу побачити правильність обрання методу з економічної точки зору.

Таблиця 3

Затрати за методами знезараження

Показник	УФ-знезараження	Парова обробка	Оцтова кислота	Термообробка (газова/вогнева)
Первинна вартість обладнання	1500–3000 грн (УФ-камера)	1000–2000 грн (парогенератор)	200–400 грн (ємності + кислота)	800–1200 грн (газова горілка)
Експлуатаційні витрати (на рік)	200–300 грн (електрика + лампа)	600–900 грн (газ/вода)	400–600 грн (кислота + засоби)	700–1000 грн (газ)

Тривалість процедури (1 вулик)	10–15 хв	30–45 хв	24 год (випаровування)	10–15 хв
Ризик пошкодження дерева	Мінімальний	Помірний	Високий (волога + кислота)	Високий (перегрів)
Ресурс/термін служби	2000 год (лампа)	1–2 роки	Кожен раз нове	Витратний газ
Захист працівника	Захисні окуляри/одяг	Перчатки, вентиляція	Респіратор, витяжка	Вогнестійкий одяг

Таблиця 4

Ефективність протигрибкових спор (*Ascosphaera*, *Aspergillus*)

Метод	Ефективність, %	Додаткові переваги
УФ (254 нм)	до 99,5	Без хімії, швидка обробка
Парова обробка	80–85	Глибоке проникнення, доступність
Оцтова кислота	до 70	Дешева, але довга дія, шкідлива пара
Вогнева/термообробка	до 90	Швидко, але небезпечно і пошкоджує воск

Таблиця 5

Умовний розрахунок на 100 вуликів / рік

Метод	Річна вартість (грн)	Примітки
УФ	~300–500	За умови ресурсу лампи 2000 годин
Парова обробка	~800–1200	Витрати палива + вода
Оцтова кислота	~900–1300	Регулярні покупки кислот
Вогнева обробка	~1000–1500	Газ + висока витрата часу

Отже, бачимо, що система УФ-знезараження економічно вигідна вже після першого сезону, при заживленні її від сонячного джерела вона стає ще вигіднішою. Метод є безпечним для деревини, не залишає залишків, не потребує витратних матеріалів після встановлення.

Висновки

Основні причини скорочення бджолосімей полягають у поєднанні біотичних, техногенних та організаційних чинників. Серед них найвагомішими є отруєння бджіл пестицидами, неправильне використання хімічних препаратів у сільському господарстві, поширення хвороб, зокрема вароозу та нозематозу, а також грибкових інфекцій, до яких бджоли вкрай вразливі в умовах послабленого імунітету. Важливу роль відіграє і кліматичний чинник – різкі зміни погоди, підвищення середньорічних температур, зниження вологості та тривалі періоди спеки. До цього додається зменшення кормової бази для бджіл внаслідок скорочення площ медоносної рослинності та вирубування лісосмуг. Окрему загрозу становлять віруси, які передаються через паразитів і слабкі сім'ї, а також недотримання ветеринарних вимог щодо профілактики та карантину. Організаційні проблеми – відсутність належного контролю, несвоєчасне проведення дезінфекції, а також нехтування сучасними знезаражувальними методами – лише посилюють кризу. З огляду на це, постає необхідність у пошуку ефективних, екологічно безпечних та економічно вигідних рішень, серед яких важливе місце займає використання ультрафіолетового випромінювання як методу знезараження вуликів та пасічного інвентарю. Такий підхід дозволяє мінімізувати ризик інфекційного ураження бджіл без застосування хімічних речовин, що робить його перспективним засобом профілактики та збереження бджолиних родин.

Список літератури:

1. Агроновини. Пчелосемей в Україні стало менше почти на 6 % / AgroPortal.ua. AgroPortal.ua. URL: <https://agroportal.ua/ru/news/zhivotnovodstvo/bdzholosimey-v-ukrajini-pomenshalo-mayzhe-na-6>.
2. Interfax-Ukraine. Смертність бджіл в Україні у 2024 р. становила 20–25 %, а втрати галузі через війну сягають 30 % / Інститут бджільництва. Інтерфакс-Україна. URL: <https://interfax.com.ua/news/general/1038912.html>.
3. Fedoriak M. RESULTS OF MONITORING OF HONEY BEE COLONY LOSSES IN UKRAINE AFTER THE WINTER OF THE FIRST YEAR OF THE WAR (2021–2022) // *Biologichni systemy*. 2024. Vol. 16, no. 3. URL: <https://doi.org/10.31861/biosystems2024.03.300>
4. Санін Ю. К. Методи та засоби впливу УФ випромінюванням для знезараження варроатозу бджіл // Thesis. 2020. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/48427>.
5. Центр громадського здоров'я України | МОЗ. URL: <https://phc.org.ua/sites/default/files/uploads/documents/files/32354b7fa7425199a4b4c67ce5a89f53.pdf>
6. Semenov A., Semenova K. Ultraviolet disinfection of water in recirculating aquaculture system: a case study at sturgeon caviar fish farm // *Acta agriculturae Slovenica*. 2022. Vol. 118, no. 3. P. 1. URL: <https://doi.org/10.14720/aas.2022.118.3.2488>.
7. Blau K., Gallert C. Efficacy of UV-C 254 nm Light and a Sporicidal Surface Disinfectant in Inactivating Spores from *Clostridioides difficile* Ribotypes In Vitro *Pathogens*. 2024. Vol. 13, no. 11. P. 965. URL: <https://doi.org/10.3390/pathogens13110965>.
8. Chen H., Moraru C. I., Protasenko V. V. Maximizing the disinfection effectiveness of 254 nm UV-C light with a special design unit: simulation and experimental approaches // *Frontiers in Food Science and Technology*. 2023. Vol. 3. URL: <https://doi.org/10.3389/frfst.2023.1223829>.
9. Ultraviolet germicidal irradiation disinfection of *Stachybotrys chartarum* / C. F. Green et al // *Canadian Journal of Microbiology*. 2005. Vol. 51, no. 9. P. 801–804. URL: <https://doi.org/10.1139/w05-061>.
10. Glover K. K., Nunayon S., Zhong L. Ultraviolet germicidal irradiation: Advances in viral inactivation and vaccine development // *Indoor Environments*. 2025. P. 100099. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indenv.2025.100099>.

Надійшла до редколегії 10.07.2025

Відомості про авторів:

Руденко Андрій Юрійович – асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет, Україна; e-mail: rudenkoau@mnau.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5103-6412>

Мардзявко Віталій Анатолійович – асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет, Україна; e-mail: mardzyavko@mnau.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7327-9215>

Вахоніна Лариса Володимирівна – канд. фіз.-мат. наук, доцент, Миколаївський національний аграрний університет, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Україна; e-mail: yakhoninalv@mnau.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1668-2275>

Кунденко Микола Петрович – д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій, Україна; e-mail: mykola.kundenko@khi.edu; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5841-4367>