



Володимир Володимирович Бабієнко,
академік НАН ВО України, доктор медичних наук,
професор, завідувач кафедри гігієни та медичної
екології Одеського національного медичного універ-
ситету. Заслужений діяч науки і техніки України.
Лікар вищої кваліфікаційної категорії, фахівець у
галузі профілактичної медицини.

Автор понад 320 наукових публікацій, монографій,
співавтор підручника для вищих учбових закладів.

Андрій Вікторович Мокієнко,
доктор медичних наук, старший науковий співробіт-
ник, доцент кафедри громадського здоров'я і фізичного
виховання Національного університету «Острозька
академія». Автор понад 800 наукових праць, серед них
20 монографій, 6 фрагментів монографій, підручника
(у 2-х томах), 5 навчальних та 2 учбових посібників,
курсу лекцій, присвячених основним питанням якості
питних та мінеральних вод, знезараження води, охоро-
ни та використання природних лікувальних ресурсів,
профілактики лікарняних інфекцій.



Антон Вікторович Шанигін,
доктор філософії в галузі знань 22 «Охорона
здоров'я», спеціальність 222 «Медицина», лікар-
терапевт, доцент кафедри гігієни, медичної екології
та громадського здоров'я Одеського національного
медичного університету.



Автор понад 50 наукових публікацій у вітчизняних і
міжнародних виданнях, праці підготовлені як само-
стійно, так і в співавторстві.

Денис Вячеславович Валькевич,
аспірант кафедри гігієни, медичної екології та гро-
мадського здоров'я ОНМедУ; лікар вищої категорії
із ортопедичної стоматології, лікар вищої категорії
із хірургічної стоматології; головний лікар клініки
щелепно-лицевої хірургії та стоматології «Сіріус»;
член Європейської асоціації черепно-щелепно-
лицевих хірургів (EACMFS).



ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ СОНЯЧНОЇ ДЕЗІНФЕКЦІЇ ПИТНОЇ ВОДИ

В.В. Бабієнко, А.В. Мокієнко,
А.В. Шанигін, Д.В. Валькевич



В.В. Бабієнко, А.В. Мокієнко,
А.В. Шанигін, Д.В. Валькевич

ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ СОНЯЧНОЇ ДЕЗІНФЕКЦІЇ ПИТНОЇ ВОДИ



В.В. Бабієнко, А.В. Мокієнко,
А.В. Шанигін, Д.В. Валькевич

ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ СОНЯЧНОЇ ДЕЗИНФЕКЦІЇ ПИТНОЇ ВОДИ

*Допущено Вченою радою Одеського національного
медичного університету як учбовий посібник
для студентів вищих навчальних медичних закладів
II-IV рівнів акредитації*

Одеса
«Прес-кур'єр»
2024

УДК 628.162:613.34.:502.65+546.134
Б125

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Одеського національного медичного університету
Міністерства охорони здоров'я України
(протокол № 1 від 30 серпня 2024 року).*

Рецензенти:

Сергета І. В. - доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри загальної гігієни та екології Вінницького національного медичного університету імені М. І. Пирогова МОЗ України;

Кацуба М. О. - доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри загальної гігієни та екології Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського МОЗ України.

В. В. Бабієнко, А. В. Мокієнко, А. В. Шанигін, Д. В. Валькевич
Б125 Теоретичні та методичні основи сонячної дезінфекції питної води : учбовий посібник / Бабієнко В.В., Мокієнко А.В., Шанигін А.В., Валькевич Д.В. - Одеса : Прес-кур'єр, 2024.
120 с.
ISBN 978-617-7797-56-1

В учбовому посібнику викладено основні теоретичні та методичні засади використання сонячної енергії для знезараження питної води за відсутності інших засобів її очищення. Представлено конспективні відомості щодо загальних принципів сонячної дезінфекції та її біоцидної дії. Надано короткий огляд сучасних досліджень. Обґрунтовано можливість використання сонячної дезінфекції води у помірному кліматі. Викладено різні методичні аспекти цього засобу знезараження питної води.

Посібник може бути використаний здобувачами вищої освіти та викладачами вищих навчальних медичних закладів II-IV рівнів акредитації, а також гігієністами, санітарними лікарями, епідеміологами, мікробіологами, співробітниками центрів контролю та профілактики хвороб МОЗ України та Держпродспоживслужби України.

ISBN 978-617-7797-56-1

© В.В. Бабієнко, А.В. Мокієнко,
А.В. Шанигін, Д.В. Валькевич, 2024

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1	
Загальні принципи сонячної дезінфекції	11
1.1 Теорія SODIS	13
1.2 Основні принципи SODIS	14
1.3 Обмеження SODIS.....	15
1.3.1 Тривалий час впливу.....	15
1.3.2 Залежність від погодно-кліматичних умов... 15	
1.3.3 Неможливість очищення води з високою каламутністю	16
1.3.4 Повторний ріст збудника	16
1.3.5 Стійкість збудника до SODIS.....	17
1.4 Можливості та проблеми для постійного використання та масштабованості SODIS	19
1.4.1 Економічна ефективність	20
1.4.2 Зручність для користувача.....	20
1.4.3 Екологічність	21
1.4.4 Жодних змін смаку води	22
1.5 Виклики	22
1.5.1 Необхідність зміни поведінки користувача ... 22	
1.5.2 Кількість виробленої води та час обробки ... 23	
1.5.3 Відсутність ПЕТ пляшки.....	24
1.5.4 Обмежені знання теорії мікробних захворювань	25
1.5.5 Побожування щодо можливого хімічного вимивання	26

РОЗДІЛ 2

Гігієнічна оцінка біоцидної дії сонячної дезінфекції	32
2.1 Бактерицидна дія УФ-А випромінювання	32
2.2 Підвищена температура	34
2.3 Синергетичний ефект УФ-А випромінювання та температури	35
2.4 Ефективність SODIS	37
2.4.1 Мікробіологічна ефективність	37
2.4.2 Вплив SODIS на здоров'я	38
2.4.2.1 Рандомізовані дослідження в кенійській громаді масаїв	39
2.4.2.2 Історії успіху в Болівії, Пакистані, Узбекистані, Непалі та Індії	39

РОЗДІЛ 3

Сучасний стан досліджень сонячної дезінфекції	47
--	----

РОЗДІЛ 4

Обґрунтування можливості використання сонячної дезінфекції води у помірному кліматі	65
4.1 Контрольні дослідження за відсутності сонячної радіації	70
4.2 Умови проведення дослідів SODIS та склад джерельної води	72
4.3 Ефективність SODIS у вологих континентальних і середземноморських кліматичних зонах	73
4.3.1 Повна інактивація колі-форм за допомогою SODIS	73
4.3.2 Інактивація ентерококів методом SODIS	76
4.3.3 Реактивація бактерій після експериментів SODIS	79
4.3.4 Термічний контроль бактеріальної інактивації: 0°C, 10°C і 20°C тести в темряві	81

4.3.5 Термічний контроль бактеріальної інактивації: тест у темряві при 43°C	82
4.4 Попередня оцінка вартості SODIS в поліетиленових пакетах.....	84

РОЗДІЛ 5

Методичні основи сонячної дезінфекції питної води.....	91
5.1 Матеріал і форма контейнерів.....	91
5.2 Форма контейнерів	92
5.3 Процедура виконання	93
5.4 Ефективність SODIS у польових дослідженнях	95
5.5 Аналіз ефективності SODIS на демонстраційних семінарах	97
5.5.1 Якість води на рівні користувача	97
5.5.2 Пляшки та підставка для пляшок.....	99
5.6 Приклад аналізу, проведеного на семінарі в Еквадорі	100
5.7 Вплив погодних умов.....	101
5.8 Навчання користувачів програмі SODIS.....	102
5.9 Методи оптимізації біоцидної ефективності сонячної дезінфекції питної води	104
5.9.1 Фотокаталіз діоксиду титану	107
5.9.2 Сонячна фототермічна дезінфекція з використанням наноматеріалів	109
ВИСНОВКИ.....	116

ВСТУП

Як відомо, джерела забруднення питної води є скрізь. Основним і загально визнаним ризиком для здоров'я, пов'язаним з питною водою, є зараження патогенними мікроорганізмами (бактеріями, вірусами, найпростішими та гельмінтами) [1]. Вживання неочищеної води призводить до передачі цих патогенних мікроорганізмів із навколишнього середовища в організм людини [2]. Внаслідок цього збудники можуть призвести до спалахів захворювань, що передаються через воду, таких як холера, лямбліоз, дизентерія, черевний тиф тощо. Тривожна реальність полягає в тому, що 25% населення світу не мають доступу до безпечної питної води вдома [2], а приблизно 2 мільярди людей залежать від забруднених джерел води [1]. Це означає недосяжність цілі сталого розвитку під номером 6, яка спрямована на забезпечення загального та рівноправного доступу до безпечної та доступної питної води для всіх до 2030 року. На жаль, найменш розвиненим країнами буде особливо складно прискорити прогрес, особливо в нестабільних умовах [3]. Наприклад, за прогнозами до 2030 року лише 37% населення Африки на південь від Сахари використовуватиме безпечну питну воду. Багато будинків у сільській місцевості країн, що розвиваються, надто малі та/або дуже розкидані, щоб виправдати витрати на встановлення систем фільтрації для високоякісного водопостачання чи централізованих очисних споруд питної води [4]. Як наслідок, більшість вдається до небезпечних джерел питної води. Крім занепокоєння забрудненням у джерелі, подальше мікробіологічне забруднення раніше безпечної води також

відбувається через негігієнічне поводження з водою під час збору, транспортування та зберігання вдома [5]. Кілька досліджень спостерігали значне погіршення мікробіологічної якості питної води між джерелом води та місцем використання (POU). Щоб захистити вразливе населення від споживання мікробіологічно забрудненої води, інноваційні методи очищення побутової води (HWT) стали практичними та економічно ефективними рішеннями. Ці методи спеціально націлені на покращення мікробіологічної якості питної води в місці використання, тим самим забезпечуючи негайне полегшення в районах, де відсутня централізована інфраструктура очищення води [6]. Комбінація методів HWT із безпечним зберіганням, яка називається обробкою та зберіганням води для домогосподарств, забезпечує тимчасові заходи для громад, щоб взяти на себе відповідальність за власне покращення мікробіологічної якості води вдома, доки вони не зможуть отримати безпечну, надійну водопровідну воду [7].

Література

1. WHO, UNICEF, World Bank. State of the World's Drinking Water. World Health Organization. 2022 Available from: <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1474551/retrieve>.
2. Gwenzi W., Chaukura N., Noubactep C., Mukome F. N. Biochar-based water treatment systems as a potential low-cost and sustainable technology for clean water provision. *Journal of Environmental Management*. 2017. V. 197. P. 732-749. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.087>.
3. WHO and UNICEF. Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000–2020: Five Years Into the SDGs. 2021. Available from: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345081/9789240030848-eng.pdf?sequence/41>.

4. REAL-Water. Technological Innovations for Rural Water Supply in Low-Resource Settings. 2022 Available from: https://www.globalwaters.org/sites/default/files/4dec_technological_innovations.pdf.
5. Yefanova S. L. N., Ouédraogo J. C. W., Ouédraogo B., Bonzi-Coulibaly Y. L. The Use of plants for drinking water disinfection: traditional knowledge, scientific validation, current challenges and prospects for the future. From Traditional to Modern African Water Management. 2022. P. 115–133. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09663-1_9.
6. Clasen T. Scaling up Household Water Treatment among low-Income Populations. World Health Organization, Geneva. 2009. Available from: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/70049/WHO_HSE_WSH_09.02_eng.pdf
7. Interventions to improve water quality for preventing diarrhoea. T. F. Clasen et al. Cochrane Database of Systematic Reviews. 2015. V.10. CD004794. <https://www.cochranelibrary.com/cdsr/doi/10.1002/14651858.CD004794.pub3/full>.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ СОНЯЧНОЇ ДЕЗІНФЕКЦІЇ

Сонячна дезінфекція води (SODIS) є одним із методів НВТ, який з роками отримав визнання та популярність. Цей метод використовує сонячне світло для інактивації мікробних патогенів у воді. Пропонується просте, економічно ефективне та екологічно чисте рішення для очищення води без утворення токсичних побічних продуктів дезінфекції. Його ефективність і потенціал заслужили офіційне визнання та рекомендацію ВООЗ. Технологія дуже проста. Прозорі контейнери із забрудненою водою піддають дії сонячного світла протягом певного часу. Цей метод комбінує дію ультрафіолетове (УФ) випромінювання та підвищеної температури для інактивації широкого спектра патогенів питної води. Піонерські дослідження, проведені в громаді масаї в Кенії [8-10] підтвердили ефективність SODIS у покращенні якості води та зниженні захворювань, що передаються через воду. Подальші дослідження та польові випробування в різних частинах світу постійно демонструють значне зниження мікробного забруднення та покращення результатів для здоров'я завдяки впровадженню SODIS.

Незважаючи на свої переваги, метод SODIS має обмеження, які перешкоджають його ефективності за певних обставин. Звичайний SODIS часто потребує тривалого часу впливу від 6 до 48 годин для досягнення ефективної дезінфекції. Це обмеження пояснюється залежністю від сонячно-

го світла та вимогою до температури води 50 °C або вище. Недостатня кількість сонячного світла або похмура погода можуть перешкоджати процесу дезінфекції, тоді як потреба у високих температурах обмежує об'єм обробки невеликими кількостями, обмежуючи її масштабованість і практичність. Тривалий час впливу та неадекватна дезінфекція можуть призвести до повторного росту бактерій у обробленій воді. Різні фактори, включаючи каламутність води та кліматичні умови, можуть впливати на процес дезінфекції та підвищувати ризик повторного розмноження бактерій, що загрожує безпеці води. Крім того, такі проблеми, як обмежений об'єм, відсутність ПЕТ-пляшок і поведінка користувачів, перешкоджають соціальному прийняттю SODIS.

У огляді [11] аналізується ефективність SODIS як методу НВТ на основі надійних науково підтверджених даних про мікробіологічну ефективність і позитивний вплив на здоров'я, про який повідомляють користувачі SODIS. Представлені обмеження, які впливають на ефективність інактивації патогенів, і проблеми, які впливають на його масштабованість і стійкість у реальних умовах. Підкреслено важливість заходів зі зміни поведінки для забезпечення послідовного та правильного застосування SODIS. Новизна полягає в розширеному дослідженні доступних стратегій та інноваційних підходів для подолання проблем, пов'язаних з ефективністю та впровадженням дезінфекції SODIS. Представлено переконливі причини для впровадження та масштабованості SODIS у країнах, що розвиваються. Нова перспектива доповнює наявну літературу щодо покращення доступу до безпечної питної води в громадах, які мають проблеми із якісною питною водою, пропонуючи цінну інформацію про розвиток SODIS як практичного та сталого рішення для НВТ.

1.1 Теорія SODIS

SODIS — це метод дезінфекції води, який базується на впливі сонячного випромінювання для знищення або інактивації патогенних мікроорганізмів у мікробіологічно забрудненій питній воді. Цей метод був схвалений ВООЗ у 2001 році та рекомендований для країн з низьким рівнем доходів та після стихійних лих або гуманітарних криз для покращення доступу до безпечної води [12, 13]. Відтоді цей метод пропагується в країнах, що розвиваються, через інформаційні та просвітницькі кампанії, навчання та консультування громадського сектору (урядових установ), мережеву діяльність, а також навчання користувачів на низовому рівні [14]. Будучи принципово новою стратегією зміни поведінки прийняття цього методу корпоративним світом залишається непривабливим, і багато хто не бажає його підтримувати. Незважаючи на це, технологія набула найбільшої популярності та прийнятності серед населення з низьким рівнем доходу. Наприкінці 2007 року було зареєстровано понад 2,1 мільйона користувачів [6]. Протягом останніх років метод досяг певного охоплення в деяких регіонах, хоча ці показники сильно відрізнялися залежно від умов (від 9 до 66%, хоча постійне використання менш однозначне). Однак існує обмежена інформація щодо практичного застосування SODIS, включаючи масштаби його застосування та географічне охоплення. Як зазначають Ballesteros et al. [15], обмежена увага приділяється реальному застосуванню методів, керованих сонячними променями, а також іншим важливим аспектам, таким як тестування регульованих мікробних індикаторів і нових патогенів. Підраховано, що до 2012 року понад 5 мільйонів людей у більш ніж 50 країнах, що роз-

вивається (Латинська Америка, Азія та Африка), були регулярними користувачами SODIS [16].

Детальна процедура застосування SODIS описана в посібнику SODIS [17]. Вона включає себе наповнення потенційно мікробіологічно забрудненої води в прозорі ПЕТ-пляшки об'ємом до 2 л і дію повного сонячного світла протягом щонайменше 6 годин у сонячний день або протягом 2 днів поспіль (48 годин), якщо є хмарність, більше 50%. Потім оброблена вода зберігається в пляшках до споживання, щоб уникнути повторного забруднення. Також рекомендується не пити протягом 24 годин, щоб уникнути можливості повторного росту після контакту [16].

1.2 Основні принципи SODIS

SODIS працює на основі двох основних принципів: використання сонячного світла для дезінфекції води та дотримання рекомендованого часу впливу. Коли вода піддається впливу сонячного світла, вона одночасно проходить два процеси, які сприяють її безпечності для споживання. Перший процес включає сонячне ультрафіолетове (УФ) випромінювання, зокрема УФ-А світло, яке має бактерицидні властивості. Це випромінювання проникає у воду, викликаючи порушення ДНК патогенів. Другий процес включає інфрачервоне тепло від сонячного світла, яке підвищує температуру води всередині пляшок. Ця підвищена температура ще більше посилює інактивацію мікроорганізмів, доповнюючи процес ультрафіолетової дезінфекції. Комбінований ефект обох стресів створює синергетичну дію, яка робить SODIS ефективним і доступним методом очищення побутової води в умовах обмежених ресурсів [18].

1.3 Обмеження SODIS

1.3.1 Тривалий час впливу

Одним із основних обмежень традиційного методу SODIS є тривалий час впливу, необхідний для досягнення ефективної дезінфекції. Час впливу зазвичай коливається від 6 до 48 годин, залежно від таких факторів, як інтенсивність сонячного світла та каламутність води. Недостатня кількість сонячного світла або хмарна погода можуть значно перешкодити процесу дезінфекції, подовжуючи час, необхідний для ефективної обробки води. Це обмеження створює проблеми в регіонах з непостійним режимом сонячного світла, особливо в певні пори року або в районах із високою хмарністю.

1.3.2 Залежність від погодно-кліматичних умов

SODIS покладається на енергію сонячного світла для інактивації патогенів у воді. Таким чином, такі фактори, як хмарність, кількість опадів і сезонні коливання інтенсивності сонячного світла, можуть впливати на ефективність процесу. Процес вимагає сприятливих кліматичних умов, тобто сонячного випромінювання та температури навколишнього середовища, бажано не нижче 500 Вт/м^2 і $20 \text{ }^\circ\text{C}$ відповідно. Кількість сонячного опромінення може значно коліватися протягом дня через хмарність [19]. Збільшення хмарності призводить до зменшення сонячного світла та зниження температури, що логічно означає повільнішу швидкість інактивації. У періоди хмарної погоди або безперервних опадів бажано збільшити час впливу SODIS до двох днів поспіль. Однак у випадках тривалої хмарності або постійних опадів

рекомендується вживати кип'ячену воду або воду, попередньо оброблену SODIS, яка зберігалася [17].

1.3.3 Неможливість очищення води з високою каламутністю

SODIS пов'язаний з потенційними труднощами в обробці сильно каламутної води. Це пояснюється тим, що висока каламутність перешкоджає проникненню сонячного світла у воду, знижуючи ефективність дезінфекції [18]. Щоб отримати більш ефективні результати, рекомендується застосовувати SODIS до відносно чистої води, < 30 NTU [20]. Це означає застосовання інших простих способів зменшення каламутності води перед сонячною обробкою. Хоча, дослідження, проведені McGuigan et al. [21] та Joуse et al. [22] продемонстрували, що SODIS може ефективно інактивувати певні патогенні бактерії навіть у дуже каламутній воді (200 NTU), за умови, що температура води перевищує 55 °С.

1.3.4 Повторний ріст збудника

Мікроорганізми, в тому числі патогенні, розвинули механізми відновлення пошкоджень ДНК, спричинених теплом та іншими стресовими факторами. Це дозволяє їм відновити свою інфективність і вижити в несприятливих умовах. Одним із важливих механізмів відновлення в різних організмах є фотореактивація, яка включає фермент фотоліази. Фотоліаза використовує енергію світла для відновлення спричиненого ультрафіолетом пошкодження ДНК. Цей процес відновлення має вирішальне значення для підтримки цілісності ДНК і запобігання накопиченню генетичних пошкоджень. Окрім фотореактивації, ексцизійне відновлення є ще одним важливим механізмом відновлення ДНК. Екс-

цизійна репарація, класифікована як базова ексцизійна репарація (BER) і ексцизійна репарація нуклеотидів (NER), також відіграє значну роль у репарації ДНК. BER включає глікозилази, тоді як NER включає полімерази. Через деякі обмеження SODIS може не повністю інактивувати всі патогени у воді. Завдяки здатності до самовідновлення патогени можуть знову з'явитися у воді, обробленій SODIS. Розуміння механізмів відновлення, які використовуються мікроорганізмами, і обмежень SODIS щодо повного усунення всіх патогенів може скерувати розробку більш ефективних стратегій очищення води. Крім того, негігієнічне поводження та погані методи зберігання можуть внести нові забруднення, включаючи патогенні мікроорганізми, в очищену воду. Це підкреслює важливість належного зберігання води та процедур поводження з нею для мінімізації ризику повторного забруднення та забезпечення безпеки води, обробленої SODIS. Рекомендується споживати очищену воду безпосередньо з оригінальних маленьких пляшок із вузьким горлечком і кришками протягом 24 годин.

1.3.5 Стійкість збудника до SODIS

Різні мікроорганізми мають різний рівень термостійкості. Такі технології, як SODIS, націлені насамперед на вегетативні форми мікроорганізмів. Однак, певні патогени можуть існувати на більш стійких стадіях, таких як цисти або спори, які не можуть бути ефективно деактивовані сонячним випромінюванням [23]. SODIS успішно знищує звичайні патогенні бактерії, що передаються у воді, після 6-годинного впливу за відповідних умов. Однак є випадки, коли фекальні коліформні бактерії демонструють повільніші темпи інактивації, а певні субпопуляції *E. coli* виявилися більш стійкими до світла та демонструють менші темпи

інактивації. Це підкреслює різноманітні реакції штамів бактерій на сонячну дезінфекцію, що свідчить про наявність факторів, які впливають на їх сприйнятливість. Хоча споруотворюючі бактерії, такі як *Bacillus cereus* і *Clostridium perfringens*, можуть протистояти SODIS, вони, як правило, не пов'язані з передачею через воду, але вивчення їхньої поведінки дозволяє зрозуміти ефективність SODIS проти більш складних мікроорганізмів.

Протозойні патогени, такі як *Giardia lamblia* та *Cryptosporidium spp.*, виявляють резистентність до SODIS через те, що їх інфекційні стадії знаходяться в захисних структурах, таких як цисти або ооцисти. Ці структури роблять їх більш стійкими до впливу навколишнього середовища, включаючи сонячне ультрафіолетове випромінювання, що ускладнює їх ефективне видалення або дезактивацію за допомогою SODIS [17]. Навіть інші кип'ятіння та хлорування не можуть повністю дезактивувати цисти [23]. Дослідження показали, що SODIS може ефективно інактивувати поліовірус, але не може суттєво знизити життєздатність цист *Acanthamoeba polyphaga* за нижчих температур [24]. Подібним чином SODIS та інші методи дезінфекції мають обмежену ефективність проти стадії цисти *A. polyphaga*. Ці висновки підкреслюють складність боротьби зі стійкими стадіями найпростіших патогенів у контексті SODIS, що потребує альтернативних підходів або вищих доз УФ для ефективної інактивації.

З іншого боку, різні види вірусів виявляють різний ступінь стійкості до сонячної дезінфекції. Деякі віруси, такі як соматичний фаг, бактеріофаг F2, бичачий ротавірус і вірус поліомієліту, були повністю інактивовані протягом кількох годин після впливу сонячного світла. Однак для повної інактивації пікорнавірусу (енцефаломіокардит) потрібен був довший час експозиції 12,5 год. У дослідженні Harding & Schwab [25] ви-

явлено, що MNV (мишачий норовірус) демонструє виняткову стійкість до SODIS. Незважаючи на 6-годинну експозицію, SODIS досяг лише 1,4 log зниження MNV. Це викликає занепокоєння щодо ефективності SODIS у профілактиці вірусного гастроентериту, викликаного норовірусом людини. Для глибшого розуміння цього питання необхідні подальші дослідження. Parsa et al. [26] стверджують, що SODIS має обмежену ефективність в інактивації вірусу SARS-CoV-2. Причиною цього полягає в специфічній структурі вірусу, що вимагає вищих температур ($>56\text{ }^{\circ}\text{C}$) і довжин хвиль УФ-С (100–280 нм) для успішної інактивації. Навпаки, звичайні системи SODIS зазвичай працюють при нижчих температурах ($<45\text{ }^{\circ}\text{C}$) і використовують УФ-А випромінювання (315–400 нм). У результаті покладатися виключно на SODIS як метод очищення стічних вод або забезпечення безпеки питної води під час пандемії може бути ненадійним підходом.

1.4 Можливості та проблеми для постійного використання та масштабованості SODIS

Таким чином, ефективність методу SODIS у зниженні впливу кишкових патогенів і покращенні мікробіологічної якості води доведена. Однак, реалізація відповідних переваг для здоров'я (зменшення діареї) може бути можлива лише за умови, що значна кількість користувачів прийме технологію та продовжуватиме використовувати її правильно та послідовно протягом тривалого часу. Це означає, що люди залишаються достатньо мотивованими та відданими інтегрувати техніку у своє повсякденне життя навіть довго після завершення інтенсивних досліджень. У цьому випадку вода, оброблена SODIS, повинна становити значно великий відсоток питної води, споживаної людьми в цільовій громаді, і її слід споживати постійно, регулярно та без перерви в постачанні

[16]. Масштабованість досягається, коли початкові дрібно-масштабні пілотні проекти, які охопили невелику кількість бенефіціарів, перетворюються на широке впровадження, яке в кінцевому підсумку досягає мільйонів [20].

1.4.1 Економічна ефективність

Вартість і готовність платити за технології HWT є важливими міркуваннями для їх впровадження. Висока ціна є однією з найважливіших перешкод і дослідження готовності платити показують, що попит на систему POU починає знижуватися, коли витрати досягають 0,3–0,4% річного доходу домогосподарства [27]. Наприклад, McGuigan et al. [16] повідомили, що причиною продовження використання SODIS, яка часто згадується, є економічна вигода, а не покращення здоров'я. З орієнтовною вартістю лише 0,63 дол. США на людину на рік [6], SODIS є одним із найдешевших домашніх заходів проти хвороб, що передаються через воду, порівняно з іншими методами, такими як кип'ятіння, хлорування, фільтрація та флокуляція, які передбачають вартість 10,56, 0,66, 3,03 і 4,95 доларів США на людину на рік відповідно [28]. Цей метод базується в основному на доступних місцевих ресурсах (ПЕТ-пляшки та сонячне світло) і його можна відтворити з низькими інвестиційними витратами [14]. Незважаючи на ці низькі витрати, ефективність методу інактивації бактерій у реальних польових застосуваннях була еквівалентна ефективності більш дорогих методів, таких як хлорування та керамічна фільтрація [17].

1.4.2 Зручність для користувача

Окрім того, що процедура застосування SODIS є економічною, вона дуже проста. Це важливо для сталого розви-

тку, оскільки стверджується, що люди більш готові змінити свою поведінку щодо технології, якщо її застосування легко виконати, а матеріали надходять з місцевих джерел. Однак ця простота також може бути недоліком. Ефективність SODIS як методу лікування часто ставиться під сумнів і зустрічається скептично через його просту процедуру. Як наслідок, його часто затьмарюють усталені методи, такі як хлорування [29]. Наприклад, у своєму дослідженні щодо встановлення факторів, що впливають на постійне використання SODIS у рамках глобальної програми просування та розповсюдження, Meierhofer & Landolt [14] повідомили, що освічених людей було важче переконати, що SODIS може ефективно очищувати питну воду. Так само Rai et al. [30] зіткнулися з жорсткою опозицією, щоб переконати здорових людей у міських нетрах щодо ефективності цього простого економічно ефективного методу.

1.4.3 Екологічність

SODIS — це екологічно безпечна технологія, яка не вимагає використання традиційних джерел енергії, таких як дрова, деревне вугілля та газ/газ. Таким чином, вирубка лісів, яка є основною екологічною проблемою в більшості країн, що розвиваються, і забруднення повітря, створене спалюванням традиційних джерел енергії, зменшуються. Наприклад, підраховано, що 1 кг деревини потрібен для кип'ятіння 1 л води [6]. Це сприяє вирубці лісів. Використовуючи SODIS, домогосподарство може заощадити приблизно 3650 кг деревини на рік. Крім того, час і енергія, які в іншому випадку були б витрачені на постачання дров, насамперед для жінок і дівчат, спрямовуються на іншу продуктивну діяльність [6]. Крім того, використання порожніх пластикових пляшок сприяє переробці твердих відходів.

1.4.4 Жодних змін смаку води

SODIS не залежить від додаткових хімічних речовин. Як наслідок, це пов'язано з мінімальною зміною смаку води і не викликає утворення шкідливих побічних продуктів дезінфекції в питній воді. Крім того, повторне забруднення дуже мало ймовірно, якщо воду споживати безпосередньо з маленьких пляшечок із вузьким горлечком і кришками, у яких вона була оброблена.

1.5 Виклики

1.5.1 Необхідність зміни поведінки користувача

Впровадження SODIS вимагає додаткових зусиль, таких як належне очищення води, регулярне очищення та заміна пляшок для запобігання росту біоплівки, щоденне керування кількома пляшками, гігієнічні практики після обробки та інші дії, які вимагають змін у поведінці та способі життя користувачів SODIS. У цьому випадку очікується, що цільова група буде більш готова змінити свою звичайну поведінку та прийняти нову відповідно до вимог технології. На жаль, люди рідко змінюють і зберігають нову поведінку. Це, у поєднанні з такими факторами, як культурні переконання, недостатня обізнаність і конкуруючі пріоритети, сприяє непослідовній прихильності та відповідності серед користувачів. Наприклад, люди можуть неохоче приймати SODIS через скептицизм або культурні практики, які сприяють альтернативним методам очищення води. В інших випадках люди можуть забути або знехтувати виставленням пляшок на сонячне світло протягом рекомендованого часу, що погіршує ефективність процесу дезінфекції. Показано відсутність чітких і перекон-

ливих переваг, які б переконали користувачів продовжувати нову поведінку. Наприклад, є труднощі в переконанні людей, які протягом життя звикли до сильного сонячного світла і ніколи не розглядали можливість того, що сонячне світло може дезінфікувати воду. Щоб підвищити ефективність SODIS, пропонується доповнити фундаментальний технічний компонент інтенсивними зусиллями, спрямованими на сприяння зміні поведінки та мотивації. Всебічна освіта громади, інформаційні кампанії та адвокація відіграють життєво важливу роль у створенні SODIS на низовому рівні.

1.5.2 Кількість виробленої води та час обробки

Хоча робота SODIS вимагає простих кроків, система підходить для обробки невеликих об'ємів води, а вплив сонячного світла зазвичай здійснюється в невеликих пластикових пляшках для напоїв. Отже, попит на безпечну питну воду не завжди задовольняється, якщо не використовується кілька пляшок одночасно. Це може створити трудомісткий процес, особливо враховуючи значний час, необхідний для очищення води, що призводить до зниження прийнятності для користувача. Тим не менш, деякі вдосконалення можуть бути використані для скорочення часу обробки. Крім того, інші дослідження продемонстрували доцільність збільшення об'єму ПЕТ-тари. Встановлено, що за умов сильного сонячного світла та помірної температури 19-літрові диспенсери для води забезпечують інактивіацію бактерій, подібно до 2-літрових ПЕТ-пляшок. Результати нещодавнього дослідження, проведеного в чотирьох сільських громадах регіону Тіграй на півночі Ефіопії, показали подібне зменшення випадків діарейних захворювань у дітей у групах імплементації (25 л ПЕТ ТЖС) і контрольної (2 л ПЕТ пляшки) [31]. В іншому дослідженні Polo-López et al. [32] спостерігали подібну кінетику

інактивації *E. coli*, фага MS2 та *C. parvum*, використовуючи 5- та 20-літрові прозорі поліпропіленові відра, виготовлені на місцевому рівні за низьку вартість у Малаві. Це призвело до 10-кратного збільшення об'єму партії обробки, що полегшило задоволення потреб більшості домогосподарств у питній воді. Ці висновки вказують на те, що альтернативні розміри контейнерів і матеріали можуть запропонувати потенційні рішення для обмежень систем SODIS на основі малих пляшок. Впровадження більших контейнерів або відер може підвищити потужність і ефективність очищення води, потенційно підвищивши практичність і прийнятність SODIS у різних умовах.

1.5.3 Відсутність ПЕТ пляшки

Місцева наявність достатньої кількості необхідних пляшок має вирішальне значення для послідовного та широкого довгострокового використання програми SODIS. У багатьох регіонах недоступність ПЕТ-пляшок є обмежуючим фактором для подальшого використання SODIS. Наприклад, відсутність пластикових ПЕТ-пляшок була найважливішою потенційною перешкодою для успішного впровадження SODIS у Зімбабве. У районах, де пластикові пляшки важкодоступні, виникає необхідність створити систему постачання для придбання та транспортування використаних пластикових пляшок із міських районів до сільських громад. Щоб вирішити проблему дефіциту ПЕТ-пляшок у деяких регіонах, запропоновано заснувати мікропідприємства. Вони відзначили успішне впровадження системи постачання пляшок у Східному Ломбоку, де місцева система охорони здоров'я ініціювала програму закупівлі порожніх пляшок у виробника ПЕТ-пляшок для розповсюдження користувачам через медичні пункти. В даний час ПЕТ-пляшки комерцій-

ного виробництва, спеціально розроблені для цілей дезінфекції води, є дефіцитними, що спонукає до використання стандартних ПЕТ-пляшок, спочатку призначених для інших цілей.

1.5.4 Обмежені знання теорії мікробних захворювань

Через нездатність погано освічених жителів села зрозуміти мікробну теорію хвороб також їм важко оцінити необхідність застосування методів очищення води. Серед неписьменних людей важко досягти розуміння зв'язку між споживанням забрудненої питної води, дотриманням правил гігієни та небезпекою невидимих патогенів для здоров'я людини. Концепція невидимих мікроорганізмів, що викликають захворювання, є абстрактною, і її важко зрозуміти без базової освіти з теорії мікробів. Багато людей не завжди сприймають обробку води як корисну для здоров'я, а діарея не завжди розглядається як серйозна загроза здоров'ю. Спостереження у Зімбабве, ще більше підтверджують думку про обмежені знання про бактеріальне забруднення води як головну проблему для впровадження SODIS. Обмежені знання про бактеріальне забруднення води були однією з головних проблем для впровадження SODIS в цій країні.

Як правило, недостатня обізнаність про наявність шкідливих бактерій у воді заважає визнати необхідність таких методів очищення води, як SODIS. Без чіткого розуміння ризиків, пов'язаних із бактеріальним забрудненням, стає важко мотивувати людей прийняти та підтримувати практику очищення води. Вирішення цієї проблеми вимагає комплексних освітніх та просвітницьких кампаній. Ці кампанії мають бути спрямовані на подолання розриву в знаннях шляхом надання доступної інформації про зв'язок між забрудненою водою, гігієнічними методами та впливом невидимих патогенів

на здоров'я людини. Сприяючи розумінню та підвищенню обізнаності, можливо, стане можливим подолати бар'єри, пов'язані з обмеженими знаннями про мікробну теорію хвороб, і сприяти впровадженню ефективних методів очищення води, таких як SODIS.

1.5.5 Побоювання щодо можливого хімічного вимивання

В огляді літератури [18] виявлено занепокоєння щодо міграції хімічних речовин, таких як сурма та фталати, з пластикових контейнерів (з ПЕТ) у їжу або воду, які вони містять. Стверджується, що вплив високих температур на пластмаси, виготовлені з ПЕТ, призводить до вимивання деяких токсичних добавок, таких як ацетальдегід, сурма та фталати. Однак, всупереч цим побоюванням, висновки інших досліджень) спростували міграцію небезпечних хімічних речовин у критичних рівнях у воду SODIS.

Тим не менш, існують альтернативи пластиковим пляшкам для застосування SODIS. Наприклад, прозорі пакети або сумки, виготовлені з матеріалів, що пропускають ультрафіолет, досліджувалися як альтернативні ємності. Виявлено, що певні типи прозорих пластикових пакетів, наприклад виготовлені з поліетилену (PE), можуть давати кращі результати порівняно з ПЕТ-пляшками, які традиційно використовуються в SODIS. Поліетиленові мішки продемонстрували швидшу дезінфекцію, досягнувши 6-log зменшення протягом 60 хвилин. Інші типи пакетів, як-от біоорієнтований поліпропілен, поліамід і ПЕТ, також перевершують ПЕТ-пляшки з точки зору ефективності дезінфекції. Орієнтація мішків або пляшок (вертикальна чи горизонтальна) суттєво не вплинула на результати дезінфекції. Використання плоских пластикових пакетів товщиною від 2 до 6 см забезпечує

покращене співвідношення площі до об'єму та вищу температуру води порівняно з традиційними круглими пляшками. Скляні ємності, оснащені складними параболічними колекторами, також виявилися ефективними та можуть вміщувати більші об'єми. Прозорі 20-літрові поліетиленові контейнери також можуть служити міцною та довговічною альтернативою стандартним пластиковим пляшкам, зменшуючи потребу в частій заміні.

Висновки

Ефективність SODIS щодо інактивації кишкових патогенів, покращення мікробної якості води та зниження захворюваності на діарейні захворювання продемонстрована різними лабораторними роботами та польовими випробуваннями. Використовуючи головним чином доступні місцеві ресурси, SODIS вдалося знизити захворюваність на діарейні захворювання на понад 75% у деяких країнах, що розвиваються.

Необхідно провести комплексні дослідження для оцінки продуктивності та обмежень інтегрованої системи за різних умов навколишнього середовища та джерел води. Створення практичних рекомендацій для користувачів має вирішальне значення для забезпечення оптимальної роботи та надійних результатів дезінфекції. Співпраця між дослідниками, інженерами та політиками є важливою для збору даних, обміну знаннями та розробки стандартизованих протоколів для реалізації комплексного підходу. Крім того, суттєве значення має підвищення обізнаності громадськості та забезпечення освіти щодо інтегрованого підходу. Громади повинні бути проінформовані про переваги, обмеження та правильне використання технології. Навчальні програми та освітні матеріали мають бути надані для розширення мож-

ливостей окремих осіб і громад для ефективного прийняття та використання інтегрованої системи, максимізації її переваг та забезпечення довгострокової стійкості [4].

Література

1. Solar disinfection of drinking water and diarrhoea in Maasai children: a controlled field trial. R. M. Conroy et al. *The Lancet*. 1996. V. 348 (9043), P. 1695-1697. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(96\)02309-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(96)02309-4).
2. Solar disinfection of water reduces diarrhoeal disease: an update. R. M. Conroy et al. *Archives of Disease in Childhood*. 1999. V. 81 (4). P. 337-338. <https://doi.org/10.1136/adc.814.337>.
3. Solar disinfection of drinking water protects against cholera in children under 6 years of age. R. M. Conroy et al. *Archives of Disease in Childhood*. 2001. V. 85 (4). P. 293-295. <https://doi.org/10.1136/adc.854.293>.
4. Phiri D. B., Bavumiragira J. P., Yin H. Efficacy of solar water disinfection treatment system in improving rural and peri-urban household drinking water quality and reducing waterborne diarrhoeal diseases. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society*. 2023. V. 72 (7). P. 1288–1308. <https://doi.org/10.2166/aqua.2023.086>
5. Rainey R. C., Harding A. K. Acceptability of solar disinfection of drinking water treatment in Kathmandu Valley, Nepal. *International Journal of Environmental Health Research*. 2005. V. 15 (5), P. 361-372. <https://doi.org/10.1080/09603120500289168>.
6. Meierhofer R. Establishing solar water disinfection as a water treatment method at household level. *Madagascar Conservation & Development*. 2006. V. 1 (1). <https://doi.org/10.4314/mcd.v1i1.44036>.

7. Meierhofer R., Landolt G. Factors supporting the sustained use of solar water disinfection - experiences from a global promotion and dissemination programme. *Desalination*. 2009. V. 248 (1-3). P. 144-151. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.050>.
8. Ballesteros M., Brindley C., Sanchez-Perez J. A., Fernandez-Ibanez P. Worldwide research trends on solar-driven water disinfection. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. V. 18 (17). 9396. <https://doi.org/10.3390/ijerph18179396>.
9. (SODIS): a review from bench-top to roof-top. Solar water disinfection. K. G. McGuigan et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2012. V. 235. P. 29-46. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.053>.
10. Luzi S., Tobler M., Suter F., Meierhofer R. SODIS Manual: Guidance on Solar Water Disinfection. SANDEC, Department of Sanitation, Water and Solid Waste for Development, Eawag, Switzerland. 2016 Available from: https://www.sodis.ch/methode/anwendung/ausbildungsmaterial/dokumente_material/sodismanual_2016_lr.pdf
11. Borde P., Elmusharaf K., McGuigan K. G., Keogh M. B. Community challenges when using large plastic bottles for solar energy disinfection of water (SODIS). *BMC Public Health*. 2016. V. 16 (1). P. 1-8. <https://doi.org/10.1186/s12889-016-3535-6>.
12. Berney M., Weilenmann H. U., Simonetti A., Egli T. Efficacy of solar disinfection of *Escherichia coli*, *Shigella flexneri*, *Salmonella typhimurium* and *Vibrio cholerae*. *Journal of Applied Microbiology*. 2006. V. 101 (4). P. 828-836. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.02983.x>.
13. World Health Organization Combating Waterborne Disease at the Household Level. World Health Organization. 2007. Available from: <https://apps.who.int/iris/>

bitstream/handle/10665/43621/9789241595223_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

14. Solar disinfection of drinking water contained in transparent plastic bottles: characterizing the bacterial inactivation process. M. McGuigan et al. *Journal of Applied Microbiology*. 1998. V. 84 (6). P. 1138-1148. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.1998.00455.x>.
15. Joyce T., McGuigan K., Elmore-Meegan M., Conroy R. Inactivation of fecal bacteria in drinking water by solar heating. *Applied and Environmental Microbiology*. 1996. V. 62 (2). P. 399-402. <https://doi.org/10.1128/aem.62.2.399-402.1996>.
16. Den Besten H. M., Wells-Bennik M. H., Zwietering M. H. Natural diversity in heat resistance of bacteria and bacterial spores: impact on food safety and quality. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2018. V. 9. P. 383-410. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030117-012808>.
17. Solar disinfection of poliovirus and *Acanthamoeba polyphaga* cysts in water - a laboratory study using simulated sunlight. W. Heaselgrave et al. *Letters in Applied Microbiology*. 2006. V. 43 (2). P. 125-130. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2006.01940.x>.
18. Harding A. S., Schwab K. J. Using limes and synthetic psoralens to enhance solar disinfection of water (SODIS): a laboratory evaluation with norovirus, *Escherichia coli*, and MS2. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*. 2012. V. 86 (4). P. 566. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.2012.11-0370>.
19. Parsa S. M., Momeni S., Hemmat A., Afrand M. Effectiveness of solar water disinfection in the era of COVID-19 (SARS-CoV-2) pandemic for contaminated water/wastewater treatment considering UV effect and temperature. *Journal of Water Process Engineering* 2021. V. 43. P. 102224. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102224>.

20. Deng Y. Making waves: principles for the design of sustainable household water treatment. *Water Research*. 2021. V. 198. 117151. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117151>.
21. Garcia-Gil A., Garcia-Munoz R. A., McGuigan K. G., Marugan J. Solar water disinfection to produce safe drinking water: a review of parameters, enhancements, and modeling approaches to make SODIS faster and safer. *Molecules*. 2021. V. 26 (11). 3431. <https://doi.org/10.3390/molecules26113431>.
22. A transdisciplinary methodology for introducing solar water disinfection to rural communities in Malawi - formative research findings. T. Morse et al. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2020. V. 16 (6). P. 871-884. <https://doi.org/10.1002/ieam.4249>.
23. Rai B., Pal R., Kar S., Tsering D. C. Solar disinfection improves drinking water quality to prevent diarrhea in under-five children in Sikkim, India. *Journal of Global Infectious Diseases*. 2010. V. 2 (3). 221. <https://doi.org/10.4103/0974-777X.68532>.
24. Solar water disinfection in large-volume containers: from the laboratory to the field. A case study in Tigray, Ethiopia. A. Garcia-Gil et al. *Scientific Reports*. 2022. V. 12 (1). P. 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23709-5>.
25. Microbiological evaluation of 5 L-and 20 L-transparent polypropylene buckets for solar water disinfection (SODIS). M. I. Polo-Lopez et al. *Molecules*. 2019. V. 24 (11), 2193. <https://doi.org/10.3390/molecules24112193>.

РОЗДІЛ 2

ГІГІЄНИЧНА ОЦІНКА БІОЦИДНОЇ ДІЇ СОНЯЧНОЇ ДЕЗИНФЕКЦІЇ

2.1 Бактерицидна дія УФ-А випромінювання

Як відомо, оптичне випромінювання в електромагнітному спектрі включає ультрафіолетове випромінювання, видиме світло та інфрачервоне випромінювання (ІЧ). Ультрафіолетове (УФ) випромінювання — це енергія, яка природним чином надходить від сонця як основного джерела і охоплює діапазон довжин хвиль 100–400 нм, що є нижчою довжиною хвилі, ніж видиме світло. УФ поділяється на три діапазони, а саме: УФ-А (315–400 нм), УФ-В (280–315 нм) і УФ-С (100–280 нм) [1, 2]. Сонячне ультрафіолетове випромінювання викликає різні біологічні впливи, такі як зміни складу білків, ДНК та інших важливих біологічних сполук. УФ має довготривалий вплив на життєво важливі фізіологічні процеси, що призводить до зниження росту та поділу клітин, втрати пігментації та уповільненого виробництва енергії, а також викликає гострий фізіологічний стрес у різних організмів. Основним механізмом інактивації патогенів під час сонячної дезінфекції є пряме або опосередковане пошкодження білків і ДНК організмів, спричинене випромінюванням в УФ-В, УФ-А та, можливо, нижньому видимому діапазоні. Коли патогени піддаються впливу сонячного світла, УФ-А-випромінювання безпосередньо взаємодіє з ДНК, нуклеїновими кислотами та ферментами їхніх клітин, змінює молекулярну структуру та зрештою призводить до їх

загибелі. Однак УФ-В відіграє незначну роль у інактивації мікроорганізмів SODIS, оскільки більша частина (95%) (а також УФ-С) поглинається шаром озону стратосфери. Крім того, ПЕТ-матеріали пляшок поглинають більшу частину УФ-В випромінювання [3].

Таким чином, УФ-А частина сонячного світла є основним фактором інактивації SODIS [4]. Коли вода піддається впливу ультрафіолетового випромінювання, комбінований ефект поглинання ультрафіолетового випромінювання та фотохімічних реакцій сприяє інактивації патогенів під час сонячної дезінфекції. Прозорі пластикові або скляні пляшки, які використовуються в SODIS, пропускають УФ-А випромінювання та поглинаються водою. Це поглинене УФ-А-випромінювання взаємодіє з мікроорганізмами, присутніми у воді, пошкоджуючи їх ДНК та ферменти. Ця взаємодія змінює молекулярну структуру, зрештою спричиняючи загибель клітин. Однак, за даними Luzi et al. [4], поглинене УФ-А випромінювання не шкодить безпосередньо генетичному матеріалу патогенів. Натомість воно запускає фотохімічні реакції всередині мікроорганізмів. Під час цих реакцій УФ-А-випромінювання взаємодіє з молекулами кисню у воді, що призводить до утворення високоактивних форм кисню (АФК), таких як синглетний кисень, супероксид, перекис водню та гідроксильний радикал. Ці АФК згодом взаємодіють і пошкоджують ДНК або білки (та інші клітинні компоненти), перешкоджаючи здатності патогенів розмножуватися та виживати [5]. Варто зазначити, що АФК можуть бути опосередковані органічними фотосенсибілізаторами, розчиненими у воді, такими як органічні молекули або залізо (екзогенний механізм), або молекулами самих патогенних організмів (ендогенний механізм) [4].

2.2 Підвищена температура

Окрім УФ-А випромінювання, сонячне світло також містить ІЧ-промені, які сприяють нагріванню води в пляшках SODIS. Підвищені температури можуть посилити інактивацію патогенів через термічні ефекти, оскільки багато мікроорганізмів чутливі до високих температур. Вищі температури також можуть прискорити біохімічні реакції, що відбуваються всередині мікроорганізмів, ще більше погіршуючи їхню життєздатність [4]. Механізм пошкодження молекулярної структури патогенних організмів відомий як термічна інактивація або пастеризація, коли температура води підвищується до 70 °С–75 °С. Під час сонячного опромінення вода зазвичай нагрівається сонячним ІЧ-випромінюванням залежно від інтенсивності опромінення, температури навколишнього середовища та місця розташування (охолодження вітром, фонове поглинання тепла). При цьому, температура води в пляшках підвищується вище температури метаболізму мікроорганізмів [4].

У цьому випадку воду не потрібно кип'ятити, щоб знизити 99,9% мікроорганізмів. Наприклад, у своєму експерименті з дослідження ефективності SODIS для кишкових патогенів Berney et al. [6] виявили, що *Vibrio cholerae* більш сприйнятливий до легкого нагрівання при температурах до 40 °С, а *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium* і *Shigella flexneri* чутливі до температури вище 45 °С. У 2015 році ВООЗ [7] представила результати різних досліджень, які показали, що патогенні мікроорганізми у воді чутливі до тепла та гинуть або інактивуються навіть при температурах нижче кипіння (менше 100 °С). За даними Clasen [8], було показано, що нагрівання води навіть до 55 °С вбиває або інактивує більшість кишкових патогенів. Як показано в табл. 2.1, нагріван-

ня води до 50–60 °C протягом 1 години має такий же ефект, як і кип'ятіння [9]. Проте все ще стверджується, що доведення води до кипіння є єдиним способом забезпечити достатньо високі температури для усунення ризику патогенних бактерій, вірусів і найпростіших.

У табл. 2.1 наведені температури та час впливу, необхідні для знищення мікроорганізмів.

Таблиця 2.1

Терморезистентність мікроорганізмів [10]

Мікроорганізм	Час та температура для 100% деструкції		
	1 хвилина	6 хвилин	60 хвилин
Enteroviruses			62 °C
Rotaviruses		63 °C for 30 min	
Faecal coliforms	Повна деструкція при 80 °C		
<i>Salmonella</i>		62 °C	
<i>Shigella</i>		61 °C	54 °C
<i>Vibrio cholera</i>			45 °C
<i>Entamoeba histolytica</i> cysts	57 °C	54 °C	50 °C
<i>Giardia</i> cysts	57 °C	54 °C	50 °C
Hookworm eggs and larvae		62 °C	51 °C
<i>Ascaris</i> eggs	68 °C	62 °C	57 °C
<i>Schistosoma</i> eggs	60 °C	55 °C	50 °C
<i>Taenia</i> eggs	65 °C	57 °C	51 °C

2.3 Синергетичний ефект УФ-А випромінювання та температури

Встановлено, що комбінований вплив сонячного тепла та ультрафіолетового випромінювання в процесі SODIS має летальний синергічний ефект, який підвищує ефективність

інактивації, набагато більшу, ніж кумулятивний ефект, який може спричинити окремий агент при індивідуальному застосуванні [4, 9, 11, 12]. При температурах вище 45–50 °С виникає синергетичний ефект термічної інактивації та УФ-А випромінювання, що значно підвищує ефективність інактивації SODIS [4]. Комбінований вплив УФ-випромінювання в УФ-А діапазоні від 320 до 400 нм і нагрівання до температури 50–60 °С має бактерицидну дію та є достатньо високим, щоб екстенсивно (99,9%) інактивувати багато кишкових мікроорганізмів. Цей же синергетичний ефект також спостерігався в дослідженні Mtapuri-Zinyowera et al. [13], де цисти *Giardia duodenalis* і *Entamoeba histolytica* або *Entamoeba dispar* були знищені, коли температура піднялася вище 50 °С, з повною загибеллю при 56 °С.

Синергетичний ефект УФ-А випромінювання та температури призводить до збільшення виробництва АФК у мікроорганізмах. Основна гіпотеза полягає в тому, що ультрафіолетове випромінювання генерує АФК, які можуть завдати шкоди нуклеїновим кислотам, білкам та іншим важливим клітинним компонентам, які забезпечують життя клітин [6]. Ці АФК, включаючи синглетний кисень і гідроксильні радикали, є високореактивними молекулами, які можуть спричинити окислювальне пошкодження різних клітинних компонентів, таких як ліпіди, білки та ДНК [6, 14]. Пошкодження ДНК, руйнування клітинних структур і окислювальний стрес в результаті цих внутрішньоклітинних механізмів разом сприяють ефективному знищенню мікроорганізмів і покращенню якості води під час сонячної дезінфекції води за допомогою SODIS (рис. 2.1).

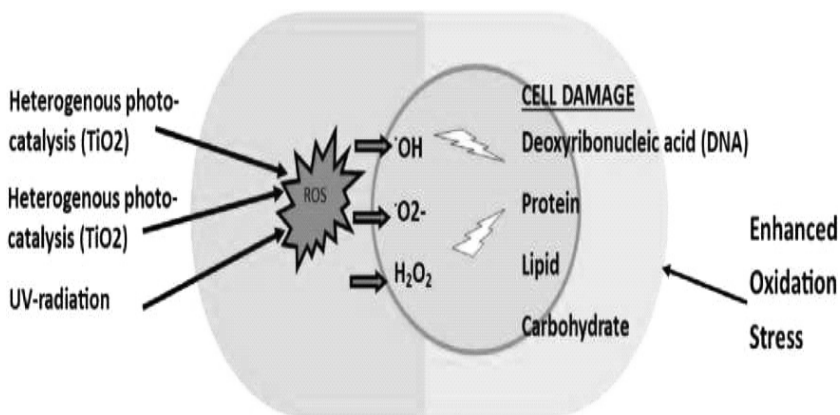


Рис. 2.1 Зображення складного процесу, під час якого патогенні організми зазнають пошкодження клітин, викликаного АФК.

2.4 Ефективність SODIS

2.4.1 Мікробіологічна ефективність

SODIS пройшов ретельні випробування як у лабораторії, так і в польових умовах, і було доведено, що він покращує мікробну якість питної води завдяки своїй біоцидній дії проти всіх патогенних мікроорганізмів, що передаються у воді [8]. Результати McGuigan et al. [15] показали, що цисти *Giardia muris* та ооцисти *Cryptosporidium parvum* стають повністю неінфекційними після обробки SODIS протягом 4 та 10 годин відповідно. Подібним чином Joyce et al. [16] повідомили про повну дезінфекцію сильно забрудненої води штамом *E. coli* дикого типу протягом 7 годин. Не було виявлено жодних життєздатних мікроорганізмів *E. coli* ні в кінці експерименту, ні через 12 годин, що вказує на відсутність відновлення бактерій після дезінфекції. Дослідження Dessie et al. [17] в Ефіопії також продемонстрували повну та необоротну інактивацию фекальних

коліформних бактерій протягом 4 годин після впливу в місцях з достатньою кількістю сонячного світла (сонячне опромінення близько 3,99 кВт/м² і вище). Декілька інших лабораторних експериментів і польових досліджень продемонстрували ефективність сонячної дезінфекції у знищенні кишкових патогенів, що викликають діарею [11]. У табл. 2.2 представлено деякі кишкові патогени, які інактивуються SODIS.

Таблиця 2.2

Види мікроорганізмів, що переносяться водою, які інактивуються SODIS [18]

Bacteria	Viruses
<i>Campylobacter jejuni</i>	Bacteriophage f2
<i>Enterococcus sp.</i>	Encephalomyocarditis virus
<i>Enteropathogenic Escherichia coli</i>	Polio virus
<i>Mycobacterium avium</i>	Rotavirus
<i>Mycobacterium intracellulare</i>	Norovirus
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Fungi
<i>Salmonella typhi</i>	<i>Fusarium sp.</i>
<i>Salmonella typhimurium</i>	<i>Candida albicans</i>
<i>Shigella dysenteriae Type I</i>	Helminth
<i>Shigella flexneri</i>	<i>Ascaris sp. (ova)</i>
<i>Streptococcus faecalis</i>	Protozoa
<i>Staphylococcus epidermidis</i>	<i>Acanthamoeba polyphaga (cyst)</i>
<i>Vibrio cholerae</i>	<i>Cryptosporidium parvum (oocyst)</i>
<i>Yersinia enterocolitica</i>	<i>Entamoeba sp. (cysts)</i>
	<i>Giardia sp (cysts)</i>

2.4.2 SODIS і здоров'я населення

Доведено, що SODIS є високоефективним підходом для покращення здоров'я населення в регіонах, де доступ до чи-

стої питної води обмежений. Різноманітні дослідження та польові випробування незмінно підтвердили ефективність SODIS у покращенні якості води та зниженні частоти захворювань, що передаються через воду. Впровадження SODIS у різних громадах призвело до значного зниження мікробного забруднення та помітного покращення результатів для здоров'я.

2.4.2.1 Рандомізовані дослідження в кенійській громаді масаїв

Піонерське дослідження, проведене в кенійській громаді масаїв, продемонструвало значний вплив SODIS на дезінфекцію води та результати для здоров'я [19-21]. У першому [19] дослідженні діти, які вживали воду після впливу сонячного світла, мали значно нижчий ризик епізодів діареї порівняно з контрольною групою. Подальше дослідження [20], спеціально націлене на дітей молодше 6 років, показало стійке зниження ризику діарейних захворювань на 16,0% через SODIS. Нарешті, під час спалаху холери діти молодше 6 років у домогосподарствах, де використовували сонячну дезінфекцію, мали значно нижчу захворюваність на холеру порівняно з контрольною групою [21]. Хоча детальна інформація про якість води в контрольних групах недоступна, результати переконливо вказують на те, що SODIS відіграв вирішальну роль у зниженні рівня захворювань у громаді.

2.4.2.2 Історії успіху в Болівії, Пакистані, Узбекистані, Непалі та Індії

SODIS досягла надзвичайного успіху в усьому світі, продемонструвавши свою ефективність у зменшенні діареї та покращенні здоров'я населення. Ці історії успіху, задокумен-

товані Meierhofer [22] і Meierhofer & Landolt [23], надають переконливі докази позитивного впливу SODIS. Наприклад, у Болівії SODIS зменшив захворюваність на діарею більш ніж на 35% серед понад 200 дітей віком до 5 років. Подібним чином в Узбекистані спостерігалось значне зниження на 53% випадків діареї серед дітей віком до 5 років. Ці приклади підкреслюють трансформаційну силу SODIS у сприянні добробуту маленьких дітей і забезпеченні для них здорового майбутнього. У Пакистанських провінціях Ражао і Чиніот рівень діареї зменшився з 26 до 13% і з 39 до 19% відповідно завдяки SODIS. У Непалі та Ассамі (Індія) SODIS довела ефективність у зниженні рівня діареї для понад 970 000 користувачів і запобігла приблизно 2,4 мільйонам випадків діареї щорічно в районах реалізації проекту. Широке впровадження цього доступного та стійкого рішення позитивно вплинуло на життя багатьох людей.

Ці висновки підтверджуються кількома іншими успішними контрольованими рандомізованими дослідженнями в типових екологічних і культурних умовах у різних країнах, включаючи Кенію, Південну Африку, Камерун, Індію та Камбоджу (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

**Зниження частоти діарейних захворювань
за допомогою SODIS у контрольованих дослідженнях**

Локація	Зменшення діарейних захворювань (%)	Посилання
Dabat district, northwest Ethiopia	40	27
Nakuru, Kenya	44	28
South Africa	36	29
Slum areas of Yaoundé, Cameroon	42.5	11

Urban slum in Vellore, Tamil Nadu, India	40	30
Rural Cambodia	50	31
Sikkim, India	75.8	32

Як видно з табл. 2.3, SODIS зменшив діарейні захворювання на 36–75% у цих країнах. Хлорування показало майже подібні результати зменшення діареї, переважно в діапазоні 30–40 % [24, 25]. Ефективність кип'ятіння у зменшенні діареї при застосуванні в домогосподарствах була погано задокументована, незважаючи на переконливі докази того, що воно може повністю знищити всі патогени в питній воді. Тим не менш, згідно зі звітом ВООЗ за 2014 рік, ефективна побутова очистка води (як кип'ятіння або фільтрація та безпечне зберігання) показала найбільше зниження захворювань на 45% [26].

Література

1. WHO. Ultraviolet Radiation. World Health Organization Geneva. Available from: https://www.who.int/health-topics/ultraviolet-radiation#tab14tab_1. 1994.
2. SODIS potential: a novel parameter to assess the suitability of solar water disinfection worldwide. J. Moreno-San Segundo et al. Chemical Engineering Journal. 2021. V. 419. 129889. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129889>.
3. Borde P., Elmusharaf K., McGuigan K. G., Keogh M. B. Community challenges when using large plastic bottles for solar energy disinfection of water (SODIS). BMC Public Health. 2016. V. 16 (1). P. 1-8. <https://doi.org/10.1186/s12889-016-3535-6>.
4. Luzi S., Tobler M., Suter F., Meierhofer R. SODIS Manual: Guidance on Solar Water Disinfection. SANDEC, Depart-

- ment of Sanitation, Water and Solid Waste for Development, Eawag, Switzerland. 2016 Available from: https://www.sodis.ch/methode/anwendung/ausbildungsmaterial/dokumente_material/sodismanual_2016_lr.pdf
5. Garcia-Gil A., Garcia-Munoz R. A., McGuigan K. G., Marugan J. Solar water disinfection to produce safe drinking water: a review of parameters, enhancements, and modeling approaches to make SODIS faster and safer. *Molecules*. 2021. V. 26 (11). 3431. <https://doi.org/10.3390/molecules26113431>
 6. Berney M., Weilenmann H. U., Simonetti A., Egli T. Efficacy of solar disinfection of *Escherichia coli*, *Shigella flexneri*, *Salmonella typhimurium* and *Vibrio cholerae*. *Journal of Applied Microbiology*. 2006. V. 101 (4). P. 828-836. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.02983.x>.
 7. World Health Organization. Technical Brief. Boil, Water (WHO/FWC/WSH/15.02). 2015. Available from: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/155821/WHO_FWC_WSH_15.02_eng.pdf?sequence=41&isAllowed=y.
 8. Clasen T. Scaling up Household Water Treatment among low-Income Populations. World Health Organization, Geneva. 2009. Available from: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/70049/WHO_HSE_WSH_09.02_eng.pdf
 9. Meierhofer R., Wegelin M. Solar Water Disinfection: A Guide for the Application of SODIS (Vol. 06/02). Water and Sanitation in Developing Countries (SANDEC). 2002. Available from: <https://www.ircwash.org/sites/default/files/Meierhofer-2002-Solar.pdf>
 10. SODIS - an emerging water treatment process. B. Sommer et al. *AQUA(OXFORD)*. 1997. V. 46(3). P. 127-137. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Yezid-Solarte-/publication/235803199_SODIS-An_emerging_wa

ter_treatment_process/links/543d17ba0cf24ef33b766ddc/SODIS-An-emerging-water-treatment-process.pdf.

11. Health gains from solar water disinfection (SODIS): evaluation of a water quality intervention in Yaounde, Cameroon. J. Graf et al. *Journal of Water and Health*. 2010. V. 8 (4). P. 779-796. <https://doi.org/10.2166/wh.2010.003>.
12. Castro-Alferez M., Polo-Lopez M. I., Marugan J. & Fernandez-Ibanez P. Mechanistic modeling of UV and mild-heat synergistic effect on solar water disinfection. *Chemical Engineering Journal*. 2017. V. 316. P. 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.026>.
13. Impact of solar radiation in disinfecting drinking water contaminated with *Giardia duodenalis* and *Entamoeba histolytica/dispar* at a point-of-use water treatment. S. Mtapuri-Zinyowera et al. *Journal of Applied Microbiology*. 2009. V. 106 (3). P. 847-852. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2008.04054.x>.
14. Probing the intracellular organic matters released from the photocatalytic inactivation of bacteria using fractionation procedure and excitation-emission-matrix fluorescence. G. Huang et al. *Water Research*. 2017. V. 110. P. 270-280. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.032>.
15. Batch solar disinfection inactivates oocysts of *Cryptosporidium parvum* and cysts of *Giardia muris* in drinking water. K. McGuigan et al. *Journal of Applied Microbiology*. 2006. V. 101 (2). P. 453-463. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.02935.x>.
16. Joyce T., McGuigan K., Elmore-Meegan M., Conroy R. Inactivation of fecal bacteria in drinking water by solar heating. *Applied and Environmental Microbiology*. 1996. V. 62 (2). P. 399-402. <https://doi.org/10.1128/aem.62.2.399-402.1996>.
17. Solar disinfection: an approach for low-cost household water treatment technology in Southwestern Ethiopia. A. Dessie et

- al. Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2014. V. 12. P. 1-6. <https://doi.org/10.1186/2052-336-X-12-25>.
18. (SODIS): a review from bench-top to roof-top. Solar water disinfection. K. G. McGuigan et al. Journal of Hazardous Materials. 2012. V. 235. P. 29-46. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.053>.
 19. Solar disinfection of drinking water and diarrhoea in Maa-sai children: a controlled field trial. R. M. Conroy et al. The Lancet. 1996. V. 348 (9043), P. 1695-1697. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(96\)02309-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(96)02309-4).
 20. Solar disinfection of water reduces diarrhoeal disease: an update. R. M. Conroy et al. Archives of Disease in Childhood. 1999. V. 81 (4). P. 337-338. <https://doi.org/10.1136/adc.814.337>.
 21. Solar disinfection of drinking water protects against cholera in children under 6 years of age. R. M. Conroy et al. Archives of Disease in Childhood. 2001. V. 85 (4). P. 293-295. <https://doi.org/10.1136/adc.854.293>.
 22. Meierhofer R. Establishing solar water disinfection as a water treatment method at household level. Madagascar Conservation & Development. 2006. V. 1 (1). <https://doi.org/10.4314/mcd.v1i1.44036>.
 23. Meierhofer R., Landolt G. Factors supporting the sustained use of solar water disinfection - experiences from a global promotion and dissemination programme. Desalination. 2009. V. 248 (1-3). P. 144-151. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.050>.
 24. Effect of in-line drinking water chlorination at the point of collection on child diarrhoea in urban Bangladesh: a double-blind, cluster-randomised controlled trial. A. J. Pickering et al. The Lancet Global Health. 2019. V. 7 (9). e1247-e1256. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(19\)30315-8](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(19)30315-8).

25. Solomon E. T., Robele S., Kloos H., Mengistie B. Effect of household water treatment with chlorine on diarrhea among children under the age of five years in rural areas of Dire Dawa, eastern Ethiopia: a cluster randomized controlled trial. *Infectious Diseases of Poverty*. 2020. V. 9. P. 1-13. <https://doi.org/10.1186/s40249-020-00680-9>.
26. World Health Organization. Preventing Diarrhoea Through Better Water, Sanitation and Hygiene: Exposures and Impacts in Low- and Middle-Income Countries. World Health Organization, Geneva. 2014.
27. The effect of SODIS water treatment intervention at the household level in reducing diarrheal incidence among children under 5 years of age: a cluster randomized controlled trial in Dabat district, northwest Ethiopia. B. D. Bitew et al. *Trials*. 2018. V. 19 (1). P. 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13063-018-2797-y>.
28. Randomized intervention study of solar disinfection of drinking water in the prevention of dysentery in Kenyan children aged under 5 years. M. Du Preez et al. *Environmental Science & Technology*. 2011. V. 45 (21). P. 9315-9323. <https://doi.org/10.1021/es2018835>.
29. Du Preez M., McGuigan K. G., Conroy R. M. Solar disinfection of drinking water in the prevention of dysentery in South African children aged under 5 years: the role of participant motivation. *Environmental Science & Technology*. 2010. V. 44 (22). P. 8744-8749. <https://doi.org/10.1021/es103328j>.
30. Solar disinfection of water for diarrhoeal prevention in southern India. A. Rose et al. *Archives of Disease in Childhood*. 2006. V. 91 (2). P. 139-141. <https://doi.org/10.1136/adc.2005.077867>.
31. McGuigan K. G., Samaiyar P., du Preez M., Conroy R. M. High compliance randomized controlled field trial of solar disinfection of drinking water and its impact on childhood

diarrhea in rural Cambodia. *Environmental Science & Technology*. 2011. V. 45 (18). 7862-7867. <https://doi.org/doi.org/10.1021/es201313x>.

32. Rai B., Pal R., Kar S., Tsering D. C. Solar disinfection improves drinking water quality to prevent diarrhea in under-five children in Sikkim, India. *Journal of Global Infectious Diseases*. 2010. V. 2 (3). 221. <https://doi.org/10.4103/0974-777X.68532>.

РОЗДІЛ 3

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ СОНЯЧНОЇ ДЕЗИНФЕКЦІЇ

«Забезпечити доступ до води для всіх», – йдеться у Цілі 6 Цілей сталого розвитку ООН. Ця глобальна проблема вимагає визначення найкращого методу знезараження води для кожного сценарію. Очищення побутової води (НWT) є ключовим інженерним втручанням для щоденних і екстрених потреб мільярдів людей у воді. Однак усталена практика НWT стикається з різними проблемами для досягнення стійкості. Стаття [1] визначає та обговорює п'ять важливих принципів для проектування сталого НWT, включаючи здатність до очищення, екологічність, досвід користувача, економічну життєздатність та соціальне визнання. Добре реалізований НWT з урахуванням енергетичної стійкості значною мірою покладається на передові матеріали, інноваційні технології та/або креативні конструкції, здатні надійно зменшувати як традиційні, так і нові забруднення, мінімізуючи при цьому небажане хімічне вимивання та утворення шкідливих побічних продуктів дезінфекції. Екологічність можна досягти шляхом значного зменшення впливу на навколишнє середовище та енергії, а також належного управління побічними продуктами дезінфекції. Тим часом орієнтований на користувача підхід до проектування та економічні міркування повинні бути інтегровані в розробку НWT, щоб підвищити готовність кінцевих користувачів використовувати та платити відповідно. Нарешті, соціальне схвалення має бути пов'язане зі сприянням громадськості та сприйняттю

ринком для посилення комерційної життєздатності продуктів НWT нового покоління. З огляду на те, що ці принципи охоплюють різні сфери, міждисциплінарна співпраця необхідна на різних етапах технологічних інновацій НWT.

Традиційні НWT мають обмеження, які включають низьку ефективність щодо певних патогенів та утворення побічних продуктів дезінфекції. Сонячні методи, такі як сонячна дезінфекція води (SODIS) або сонячний фотокаталіз, є новими, ефективними та фінансово та екологічно стійкими альтернативами. Автори [2] провели критичне дослідження публікацій у сфері знезараження води за допомогою сонячної енергії та представили перший за останні 20 років бібліометричний аналіз наукової літератури з бази даних Scopus компанії Elsevier. Результати свідчать, що в цій сфері, що викликає зростаючий інтерес, США, Іспанія та Китай є найпродуктивнішими країнами з точки зору видавничої справи, проте в Європі знаходяться найбільш визнані дослідницькі групи – Іспанія, Швейцарія, Ірландія та Великобританія. Автори також переглянули журнали, в яких переважно публікуються дослідники. Використовували системний підхід для визначення фактичних дослідницьких тенденцій та прогалін. Проаналізували здатність цих публікацій відповісти на ключові дослідницькі питання, визначивши шість кластерів ключових слів щодо основних дослідницьких викликів, відкритих областей та нових застосувань, які чекають попереду. Більшість публікацій були зосереджені на SODIS та фотокаталітичних наноматеріалах, тоді як обмежена кількість була зосереджена на забезпеченні належного рівня знезараження води, тестуванні регульованих мікробних показників та нових патогенів, а також реальних застосувань, які включають складні матриці, великомасштабні процеси та вичерпну оцінку витрат.

Дослідження [3] було спрямоване на розробку, створення прототипу та тестування ефективності сонячної системи дезінфекції для покращеного очищення води в сільських домогосподарствах Малаві. Система була побудована з місцевих матеріалів. Ефективність і дієвість системи інактивації мікроорганізмів визначали за допомогою забруднених зразків сирової води, зібраних у сільській місцевості. Після 3 годин впливу інтенсивного сонячного світла при температурі води в пляшці 66 °C у зразках води не було зареєстровано колі-форм (загальних або фекальних), що відповідало допустимим нормам для питної води за стандартами Малаві та ВООЗ. При завантаженні 12 л забрудненої води ефективність системи склала 10,2%. Температура дезінфекції досягала швидше (80 хвилин) в умовах інтенсивного сонячного світла та низької каламутності. Апробована система була економічно ефективна і проста у використанні, тому її рекомендовано для вдосконалення очищення води в сільській місцевості.

Впродовж десятиліть досліджень та інноваційних розробок технологія ультрафіолетової дезінфекції значно вдосконалила типи води, які можна обробляти, експлуатацію та технічне обслуговування УФ-обладнання та загальну економічну ефективність УФ-системи. Сонячна дезінфекція води, також відома як SODIS, — це система очищення води з використанням двох легкодоступних матеріалів: сонячного світла та пластикових ПЕТ-пляшок. SODIS вирішує проблему захисту води від мікроорганізмів, які викликають захворювання, що передаються через воду, просто поміщаючи забруднену воду в прозорі пластикові пляшки та виставляючи їх на сонячне світло. Це робить SODIS чудовим інструментом у наборі для виживання. Тип і форма ємності, яка використовується для очищення води SODIS, є важливими. Ефективність SODIS залежить від фізичного стану пласти-

кових пляшок. Механічні подряпини та старіння знижують ефективність SODIS. Сильно подряпані або старі пляшки слід замінити [4].

На думку авторів [5] сонячна дезінфекція води (SODIS) є одним з найдешевших і найбільш підходящих методів обробки для отримання безпечної питної води на рівні домогосподарств в умовах обмежених ресурсів. У цьому огляді представлено основні параметри, які впливають на процес SODIS, і те, як нові вдосконалення та підходи до моделювання можуть подолати деякі поточні недоліки, які обмежують його широке впровадження. Збільшення об'єму контейнера може зменшити ризик повторного забруднення, викликаного маніпуляцією кількома 2-літровими пляшками. Використання контейнерних матеріалів, відмінних від поліетилентерефталату (ПЕТ), значно підвищує ефективність інактивації вірусів і найпростіших. Крім того, зазвичай рекомендується переоцінка часу сонячного опромінення, оскільки на успіх процесу часто впливає багато факторів, які знаходяться поза контролем користувача SODIS. Розробка точних кінетичних моделей має вирішальне значення для забезпечення виробництва безпечної питної води. У цій роботі зроблено спробу переглянути відповідні знання про вплив змінних SODIS і методи, які використовуються для розробки кінетичних моделей, описаних у літературі. Окрім типу та концентрації патогенів у неочищеній воді, ідеальна кінетична модель повинна враховувати всі критичні фактори, що впливають на ефективність процесу, такі як інтенсивність, спектральний розподіл сонячного випромінювання, спектри пропускання стінок контейнера, старіння матеріалу реактора SODIS і хімічний склад води, оскільки речовини у воді можуть відігравати важливу роль як послаблювачі випромінювання та/або сенсibilізатори, запускаючи процес інактивації.

У роботі [6] обґрунтовується доцільність застосування SODIS не тільки в тропічних і субтропічних країнах з низьким рівнем доходу, але й високорозвинених країнах, розташованих у помірному кліматі. Щоб дослідити це питання, експерименти SODIS проводили у вологому континентальному кліматі Фінляндії, піддаючи забруднену фекальними колі-формами питну воду природному сонячному випромінюванню при різних температурах води (8–23 °С) та інтенсивності УФ (12–19 Вт/м²) у поліетиленових (ПЕ) мішках. Контрольні експерименти SODIS з таким же експериментальним планом додатково проводилися в середземноморському кліматі Іспанії в типових умовах застосування SODIS (~39 °С і 42 Вт/м²).

З усіх експериментів найвищу ефективність інактивації колі-форм та ентерококів з точки зору найнижчих необхідних доз для 4-log дезінфекції (25 Вт·год/м² і 60 Вт·год/м² відповідно) було отримано у вологому континентальному кліматі при найнижчій вивченій середній температурі води (8–11 °С). Незважаючи на низьке середнє УФ-опромінення (~19 Вт·год/м²), 4-log дезінфекція колі-форм і ентерококів також була досягнута швидко в цих умовах (1 год 27 хв і 3 год 18 хв відповідно). Загалом дози, необхідні для дезінфекції, збільшувалися в міру підвищення температури води та інтенсивності ультрафіолетового випромінювання під час експериментів. Дезінфекція 4-logs (> 99,99%) обох бактерій була досягнута в усіх експериментах SODIS протягом 6 годин, що свідчить про те, що SODIS може бути достатнім методом очищення води для домогосподарств навіть у більш холодному кліматі, на відміну від того, що вважалося раніше. Вплив різних температур води на інактивацію бактерій також перевіряли за відсутності сонячного світла. Разом отримані результати вказують на те, що хоча температура води, яка нижче або близька до оптимуму колі-форм і ентерококів (~10 °С), сама по собі

не викликає інактивації, ці температури можуть підвищити продуктивність SODIS. Це явище пояснюється повільнішим метаболізмом бактерій і, отже, повільнішим фоторепаруванням, викликаним низькою температурою води.

В експериментально - модельному дослідженні ефективності сонячного знезаражування побутової води вивчали потенціал інактивації SODIS бактерій під сонячним опроміненням в різні сезони в Бангладеш відповідно до протоколу оцінки HWT BOO3 [7]. Експерименти SODIS проводилися з використанням ПЕТ-пляшок і пластикових пакетів. Влітку спостерігалось значення логарифму зниження (LRV) понад 5 для ПЕТ-реакторів протягом 6–8 годин впливу сонячного світла, а очищена вода відповідала мікробному стандарту нульових КУО/100 мл для питної води. У мусонний період і взимку $LRV > 4$ можна було досягти за 16 годин і 8 годин впливу сонячного світла. Пластиковий пакет виявився ефективнішим, ніж ПЕТ. Оцінено безпечний час впливу, який необхідно підтримувати для застосування SODIS, щоб досягти 4,0 LRV, а також запобігти повторному росту мікроорганізмів у обробленій воді. Автори рекомендують SODIS для використання в громадах з небезпечним питним водопостачанням.

Автори роботи [8] стверджують, що методи обробки води на місці використання, такі як сонячна дезінфекція води (SODIS), виявляють великий потенціал для зменшення глобального тягаря діареї. Комплексні мікробіологічні дослідження продемонстрували ефективність SODIS для знищення збудників діареї в забрудненій питній воді. З 2000 року SODIS просувається в країнах, що розвиваються, через інформаційні та просвітницькі кампанії, навчання та консультування громадського сектору (урядових установ), мережеву діяльність, а також навчання користувачів на базовому рівні. Нині метод використовують у 33 країнах світу понад 2 мільйони людей. Кілька оцінок проектів і досліджень впливу

на здоров'я показують, що захворюваність на діарею серед користувачів SODIS знизилася на 16–57%. Через рік після реалізації проекту 20–80% навчених людей регулярно використовували SODIS. У цьому документі розглядаються фактори, що впливають на прийняття та постійне використання SODIS на базовому рівні, тобто місцева доступність пляшок, повторне просування та навчальні програми, мотивація та відданість промоутерів, рівень освіти користувачів, соціальний тиск та інституційні аспекти.

У статті [9] досліджується всесвітня застосовність технології сонячної дезінфекції води (SODIS) через новий параметр: потенціал SODIS. Цей параметр визначається як зворотне співвідношення між необхідним часом експозиції для досягнення чотирьох логарифмів дезінфекції *E. coli* та шістьма годинами, рекомендованими стандартним протоколом SODIS. Кінетику інактивації *E. coli* було передбачено шляхом підгонки результатів за різних температур і падаючого випромінювання до напівемпіричної моделі інактивації, включаючи синергію між джерелами бактеріального стресу (світло/тепло). Щоб оцінити потенціал SODIS, був розроблений сонячний калькулятор на основі положення Сонця, атмосферного тиску, хмарного покриву та висоти. Загальна радіація, що змінюється в часі, доступна в будь-якому місці в усьому світі, була оцінена для кожного дня року протягом годин сонячного світла. Температуру, що змінюється в часі, також оцінювали за мінімальними та максимальними значеннями, вводячи її динамічні зміни разом із сонячним опроміненням води. Значення падаючої радіації та температури вводили в кінетичну модель для оцінки швидкості дезінфекції. На основі цих значень розраховували кількість серійних дезінфекцій, які можуть досягти 99,99% інактивації бактерій за 1 день, і мінімальний щоденний час, необхідний для досягнення цієї мети. Останній остаточно трансформували в

потенціал SODIS. Результати дослідження, зображені у вигляді контурів, що вказують на потенціал SODIS та інші відповідні індикатори, накладені на карту світу, підтверджують, що широта має значний внесок у потенціал SODIS, з найвищими значеннями поблизу екватора. Однак, результати також підкреслюють важливість температури та хмарного покриву з критичними відмінностями між регіонами на однаковій широті.

В серії експериментів виявлено та охарактеризовано процес інактивації кенійського ізоляту *E. coli* у сильно забрудненій питній воді в прозорих пластикових пляшках під впливом сонячного світла [10]. Детально вивчена роль механізмів оптичної та теплової інактивації шляхом моделювання умов оптичного опромінення, каламутності води та температури. Ефекти оптичної інактивації спостерігалися навіть у дуже каламутній воді (200 NTU) і при низькій освітленості (10 мВт/см²). Встановлено, що термічна інактивація важлива лише при температурі води вище 45 градусів Цельсія, коли спостерігається сильна синергія між процесами оптичної та термічної інактивації. Результати підтверджують, що там, де є сильне сонячне світло, сонячна дезінфекція питної води є ефективним і недорогим методом покращення якості води та може бути особливо корисною для таборів біженців у зонах лиха. Обговорюються стратегії покращення інактивації бактерій.

Автори [11] повідомили про кінетику інактивації пакетної сонячної дезінфекції (SODIS) суспендованих у воді *Campylobacter jejuni*, *Yersinia enterocolitica*, ентеропатогенної *E. coli*, *Staphylococcus epidermidis* та ендоспор *Bacillus subtilis* під впливом сильного природного сонячного світла в Іспанії та Болівії. Час впливу для повної інактивації (принаймні 4 логарифми) в умовах сильного природного сонячного світла (максимальне опромінення $\sim 1050 \text{ Вт м}^2 \pm 10 \text{ Вт м}^2$)

був таким: *C. jejuni*, 20 хв; *S. epidermidis*, 45 хв.; ентеропатогенна *E. coli*, 90 хв; *Y. enterocolitica*, 150 хв. Після неповної інактивації ендоспор *B. subtilis* у перший день повторна експозиція цих зразків на наступний день виявила, що 4% ендоспор залишаються життєздатними після сукупного часу впливу 16 годин сильного природного сонячного світла. Показано, що SODIS є ефективним проти вегетативних клітин низки збудників, що передаються через воду. Однак, спори бактерій резистентні до цієї дезінфекції.

Мета роботи [12] полягала у визначенні можливості використання пакетної сонячної дезінфекції (SODIS) для інактивації ооцист *Cryptosporidium parvum* і цист *Giardia muris* в експериментально забрудненій воді. Суспензії ооцист і цист піддавалися імітаційному сонячному випромінюванню 830Вт/м^2 протягом різного часу впливу при постійній температурі $40\text{ }^\circ\text{C}$. Час впливу ≈ 10 год (загальна оптична доза приблизно 30кДж) зробив ооцисти *C. parvum* неінфекційними. Цисти *G. muris* були повністю неінфекційними протягом 4 год (загальна оптична доза $>12\text{ кДж}$). Скануюча електронна мікроскопія та дослідження життєздатності ооцист *C. parvum* показали, що інактивація спричинена пошкодженням стінки ооцисти. Результати показали, що цисти *G. muris* і ооцисти *C. parvum* стають повністю неінфекційними після експозиції SODIS протягом 4 і 10 годин відповідно, а також, ймовірно, ефективні проти цист *Giardia lamblia*. Автори приходять до висновку, що SODIS є відповідною технологією очищення води в домашніх умовах для використання в якості екстреного втручання в ліквідацію наслідків природних або техногенних катастроф проти не тільки бактеріальних патогенів, але й паразитарних збудників.

В огляді [13] (2012 рік) зроблено спробу переглянути всі відповідні знання про сонячну дезінфекцію, починаючи з мікробіологічних питань, лабораторних досліджень, пі-

лотних випробувань, включно з реальними дослідженнями застосування; обмеженнями, факторами, що впливають на впровадження техніки та впливом на здоров'я. На той час сонячна дезінфекція води (SODIS) була відома вже більше 30 років. Неодноразово було доведено, що цей метод ефективний для знищення мікробних патогенів і зниження захворюваності на діарею, включаючи холеру. З 1980 року було проведено багато досліджень механізмів загибелі мікроорганізмів під впливом сонячного випромінювання, запропоновано можливі технології покращення, щоб зробити це швидшим і безпечнішим. Оскільки SODIS є простим у використанні та недорогим, метод поширився по всьому світу і щоденно використовується в більш ніж 50 країнах Азії, Латинської Америки та Африки. Понад 5 мільйонів людей дезінфікують питну воду за допомогою технології сонячної дезінфекції (SODIS).

У роботі [14] представлено результати експериментів, спрямованих на підвищення ефективності процесу інактивації при сонячному знезараженні питної води. Було досліджено вплив періодичного перемішування, покриття задньої поверхні контейнера алюмінієвою фольгою, об'єму контейнера та каламутності на кінетику сонячної інактивації *E. coli* (початкова інокуляція = 10^6 КУО/мл). Показано, що перемішування сприяло вивільненню розчиненого кисню з води з подальшим зниженням швидкості інактивації *E. coli*. Навпаки, покриття задньої поверхні контейнера для сонячної дезінфекції алюмінієвою фольгою підвищило ефективність інактивації. Встановлено, що середня константа інактивації у пляшках із фольгою на 1,85 (стандартне відхилення = 0,43) вища, ніж у пляшках без фольги. Швидкість інактивації зменшувалася зі збільшенням каламутності. Кінетика інактивації не залежала від об'єму ємності з водою для об'ємів у діапазоні 500-1500 мл.

Запропоновано механічну модель інактивації *E. coli* під дією SODIS [15]. Інактивація бактерій пояснюється комбінованим ефектом: і) УФ-фотонів, які поглинаються бактеріями та виробляють внутрішньоклітинні активні форми кисню (АФК), що викликають окисне пошкодження, і ii) помірного підвищення температури води (зазвичай від 25 °С до 50 °С), що прискорює процес інактивації бактерій. У цій роботі запропоновано модель, засновану на спрощеному підході кінетичних реакцій, які пояснюють синергію між УФ-випромінюванням і температурою для успішного відтворення результатів експериментів SODIS. Основними факторами, які розглядаються в цій моделі, є (i) фотоіндуковане утворення внутрішньоклітинних АФК з кисню та фотосенсибілізаторів, що враховує внутрішні термічні та фотореакції Фентона; (ii) термічну та фотоінактивацію каталази та супероксиддисмутази та (iii) внутрішні пошкодження внаслідок дії цих окисних та термічних ефектів. Продемонстровано, що нова модель відтворює часовий профіль концентрації кишкової палички в чистій воді при різних температурах (10 – 55 °С) і при різному сонячному випромінюванні (30 – 50 Вт/м² УФ). Відмінне узгодження між моделлю та експериментальними результатами свідчить про те, що механічна модель, яка враховує синергетичний ефект між УФ-випромінюванням і температурою, є реалістичним підходом для моделювання процесу сонячної дезінфекції води.

У дослідженні [16] оцінена можливість прогнозування ефективності сонячної дезінфекції води (SODIS) для видалення бактеріальних патогенів шляхом розробки тривірневого плану: по-перше, проведена систематична інактивація *E. coli* (in vitro) у воді Женевського озера в різних контрольованих умовах температури води (20–50 °С), інтенсивності сонячного світла (0–1200 Вт/м²), наявності природних розчинених органічних речовин (DOM, 0–6 мг/л) і каламутності (0–50

NTU). На другому етапі кінетична оцінка призвела до вибору найбільш релевантних параметрів для включення в теоретичне формулювання нової статичної та динамічної моделі. Статичні та динамічні моделі достовірно описували результати експерименту (інактивація бактерій за різних кліматичних умов) і розглядалися як однаково прийнятні кандидати для моделювання дезінфекції. На останньому етапі розглядалися дані про температуру навколишнього середовища, падаючу радіацію та дані про хмарний покрив для прогнозування ефективності SODIS в Африці. Результати моделювання порівнювали з експериментальними даними. Показано, що більшість африканських регіонів придатні для процесів SODIS, але є зони ризику, пов'язані з кліматичними умовами (хмарність і температура). Результати цього дослідження можуть бути застосовані для регіональних стратегій прийняття рішень щодо застосування SODIS або для пошуку життєздатних альтернатив SODIS у випадках, коли він вважається непридатним.

Мета роботи [17] полягала у визначенні ефективності сонячної дезінфекції (SODIS) для кишкових патогенів. Встановлено, що для логарифму 99% інактивації (F99) стійкість до сонячного світла при 37 °C ранжувалась наступним чином: *Salmonella typhimurium* > *Escherichia coli* > *Shigella flexneri* > *Vibrio cholerae*. Хоча значення F90 для *Salm. typhimurium* та *E. coli* були подібними, значення F99 відрізнялися на 60%. Чутливість до тепла спостерігалася при температурі вище 45 °C для *E. coli*, *Salm. typhimurium* і *S. flexneri*, тоді як для *V. cholerae* вище 40 градусів C. Таким чином, *Salm. typhimurium* була найстійкішою, а *V. cholerae* – найменш стійким кишковим штамом. Автори приходять до висновку, що *E. coli* може бути невідповідним індикатором для перевірки ефективності SODIS щодо інактивації кишкових бактеріях.

Оцінено здатність реакторів періодичної дії для сонячної дезінфекції (SODIS) і сонячної фотокаталітичної (TiO_2) дезінфекції (SPC-DIS) інактивувати водні найпростіші, гриби та бактерії. Після 8 годин імітованого сонячного опромінення (870 Вт/м^2 в діапазоні 300 нм, 200 Вт/м^2 в діапазоні УФ 300–400 нм) як SPC-DIS, так і SODIS досягли зниження принаймні на 4 логарифми життєздатності найпростіших (трофозойна стадія *Acanthamoeba polyphaga*), грибів *Candida albicans*, *Fusarium solani*) і бактерій (*Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*). Для спор *Bacillus subtilis* було зафіксовано зниження лише на 1,7 логарифми. І SODIS, і SPC-DIS були неефективними проти цист *A. polyphaga*.

В останні роки було проведено величезну кількість досліджень і розробок у галузі фотокаталізу (гетерогенного та гомогенного), процесу, включеного в особливий клас методів окислення, визначених як Advanced Oxidation Processes (AOP). У цій статті [19] розглядається використання сонячного світла для отримання радикалів ОН за допомогою фотокаталізу TiO_2 і процесу фото-Фентона. Описано реакційні системи, необхідні для проведення сонячного фотокаталізу. Підсумовується більшість проведених досліджень, пов'язаних із сонячною фотокаталітичною деградацією забруднень води, і те, як це може значно сприяти обробці стійких токсичних сполук. Описано, як підвищити ефективність процесу шляхом інтеграції з біообробкою. Детально описано різні сонячні реактори для фотокаталітичної обробки води, в основному засновані на неконцентруючих колекторах, побудовані протягом останніх кількох років, а також використання сонячних фотокаталітичних процесів для інактивації мікроорганізмів, присутніх у воді, з особливим наголосом на експериментальні системи, створені для оптимізації цієї техніки дезінфекції.

Традиційне сонячне знезараження води має низьку ефективність. Наноматеріали, що перетворюють сонячну енергію на тепло, забезпечують синергію сонячного випромінювання та тепла для знищення бактерій, що переносяться водою. У роботі [20] досліджено механізм інактивації бактерій за допомогою сонячного реактора дезінфекції на основі плівки з вуглецевих нанотрубок, яка перетворює сонячну енергію на тепло. Фототермічний реактор продемонстрував синергетичне посилення інактивації *E. coli* з ефективністю $>5 \log$ інактивації за 20 хвилин у статичних умовах. Порівняно з сонячним випромінюванням або лише теплом сонячна фототермічна дезінфекція викликала 2-кратне накопичення активних форм кисню (АФК) і на 40% вищу інактивацію каталази та супероксиддисмутази. Фотоіндуковане тепло було критичним для інактивації бактерій. Транскриптомний аналіз показав, що синергія сонячного випромінювання та фотоіндукованого тепла порушує реакцію бактерій на тепловий стрес. Декілька метаболічних шляхів, пов'язаних з утворенням АФК, які повинні регулюватися тепловим стресом, залишалися незмінними на сонячному світлі, але експресія *safA* (гена, що кодує каталазу) була заблокована сонячним світлом, спричиняючи накопичення АФК. Величезна кількість АФК атакувала клітинні мембрани та РНК і, нарешті, призвела до загибелі клітини. Цей метод забезпечує можливу альтернативу дезінфекції питної та очищеної води з високою ефективністю, низьким споживанням енергії та відсутністю токсичних побічних продуктів.

Метою дослідження [21] була оцінка ефективності сонячної дезінфекції шляхом гетерогенного фотокаталізу золь-гель іммобілізованими плівками TiO_2 на скляних циліндрах. Процес сонячної дезінфекції, відомий як SODIS, розглядався як еталон. Визначали ефективність дезінфекції джерельної води, природно забрудненої колі-формними

бактеріями під впливом сонячного світла в пластикових пляшках з TiO_2 і без нього над простими сонячними колекторами. Дезінфекція за допомогою TiO_2 була більш ефективною, ніж процес SODIS, при інактивації загальних та фекальних колі-формних бактерій. У сонячний день (понад 1000 Вт/м²) для дезінфекції іммобілізованим TiO_2 знадобилося 15 хвилин опромінення для повної інактивації фекальних колі-форм і 30 хвилин для інактивації загальних колі-форм. Тобто, менш ніж за половину часу, необхідного для SODIS, очищена вода відповідала мікробним стандартам для питної води в Мексиці. Іншою важливою частиною цього дослідження було визначення повторного росту бактерій у воді після перевірки процесів дезінфекції. Після SODIS спостерігався повторний ріст колі-форм. Навпаки, при використанні каталізатора TiO_2 повторного росту колі-форм не було виявлено ні для загальних, ні для фекальних колі-форм. Процес дезінфекції з використанням TiO_2 зберігав очищену воду вільною від колі-форм принаймні протягом семи днів після сонячного опромінення. Результати підтверджують можливість застосування цього простого методу в сільській місцевості країн, що розвиваються.

Література

1. Yang D. Making Waves: Principles for the Design of Sustainable Household Water Treatment. *Water Res.* 2021. V. 15 (198). 117151. DOI:10.1016/j.watres.2021.117151
2. Ballesteros M., Brindley C., Sánchez-Pérez J. A., Fernández-Ibañez P. Worldwide research trends on solar-driven water disinfection. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2021. V. 18. 9396. <https://doi.org/10.3390/ijerph18179396>
3. Chidya R. C., Munthali A. K., Chitedze I., Chitawo M. L. Design and efficacy of solar disinfection system for improved

- rural household water treatment. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 2021. V. 9 (4). P. 1–16. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d8.0369>.
4. Davarcioglu B. Solar water disinfection considerations: using ultraviolet light methods to make water safe to drink. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*. 2015. V. 2. P. 253–264. https://ijiset.com/vol2/v2s8/IJSET_V2_I8_35.pdf.
 5. García-Gil Á., García-Muñoz R. A., McGuigan K. G., Marugán J. Solar water disinfection to produce safe drinking water: a review of parameters, enhancements, and modelling approaches to make SODIS faster and safer. *Molecules*. 2021. V. 26 (11). 3431. <https://doi.org/10.3390/molecules26113431>
 6. Solar disinfection – An appropriate water treatment method to inactivate faecal bacteria in cold climates. A. Juvakoski et al. *Science of The Total Environment*. 2022. V. 827. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154086>
 7. Effectiveness of solar disinfection for household water treatment: an experimental and modeling study. M. Karim et al. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*. 2021. V. 11 (3). P. 374–385. <https://doi.org/10.2166/washdev.2021.243>.
 8. Meierhofer R., Landolt G. Factors supporting the sustained use of solar water disinfection — Experiences from a global promotion and dissemination programme. *Desalination*. V. 248. N 1–3. P. 144-151. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.050>.
 9. SODIS potential: A novel parameter to assess the suitability of solar water disinfection worldwide. J. Moreno-SanSegundo et al. *Chemical Engineering Journal*. 2021. V. 419. 129889. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129889>

10. Solar disinfection of drinking water contained in transparent plastic bottles: characterizing the bacterial inactivation process. K. G. McGuigan et al. *J. Appl Microbiol.* 1998. V. 84(6). P. 1138-1148. DOI: 10.1046/j.1365-2672.1998.00455.x
11. Bactericidal effect of solar water disinfection under real sunlight conditions. M. Boyle et al. *Applied and Environmental Microbiology.* 2008. V. 74 (10). P. 2997–3001. <https://doi.org/10.1128/AEM.02415-07>.
12. Batch solar disinfection inactivates oocysts of *Cryptosporidium parvum* and cysts of *Giardia muris* in drinking water. K. McGuigan et al. *Journal of Applied Microbiology.* 2006. V. 101 (2). P. 453–463. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.02935.x>.
13. Solar water disinfection (SODIS): a review from bench-top to roof-top. K. G. McGuigan et al. *Hazard Mater.* 2012. V. 235-236. P. 29-46. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.07.053.
14. Effect of agitation, turbidity, aluminium foil reflectors and container volume on the inactivation efficiency of batch-process solar disinfectors. S. C. Kehoe et al. *Water Res.* 2001. V. 35(4). P.1061-1065. doi: 10.1016/s0043-1354(00)00353-5.
15. Castro-Alfárez M., Polo-López M. I., Marugán J., Fernandez-Ibanez P. Mechanistic modeling of UV and mild-heat synergistic effect on solar water disinfection. *Chemical Engineering Journal.* 2017. V. 316. P. 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.026>.
16. Predicting the bactericidal efficacy of solar disinfection (SODIS): from kinetic modeling of in vitro tests towards the in silico forecast of *E. coli* inactivation. S Samoili et al. *Chemical Engineering Journal.* 2022. V. 427.
17. Berney M., Weilenmann H.-U., Simonetti A., Egli T. J. Efficacy of solar disinfection of *Escherichia coli*, *Shigella flexneri*, *Salmonella typhimurium* and *Vibrio cholerae*. *Appl.*

- Microbiol. 2006. V. 101(4). P. 828-836. doi: 10.1111/j.1365-2672.2006.02983.x.
18. Solar and photocatalytic disinfection of protozoan, fungal and bacterial microbes in drinking water. J. Lonnen et al. *Water Research*. 2005. V. 39 (5). P. 877–883. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.11.023>
 19. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends. S. Malato et al. *Catalysis Today*. 2009. V. 147 (1). P. 1–59. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.06.018>.
 20. Mechanisms of *Escherichia coli* inactivation during solar-driven photothermal disinfection. Y. Hong et al. *Environmental Science: Nano*. 2022. V. 9 (3). P. 1000–1010. <https://doi.org/10.1039/d1en00999k>.
 21. Gelover S., Gómez L.A., Reyes K., Leal M.T. A practical demonstration of water disinfection using TiO₂ films and sunlight. *Water Res*. 2006. V. 40(17). P.3274-3280. doi: 10.1016/j.watres.2006.07.006.

РОЗДІЛ 4

**ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ
ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОЇ
ДЕЗИНФЕКЦІЇ ВОДИ
У ПОМІРНОМУ КЛІМАТІ**

SODIS робить питну воду безпечнішою, оскільки інактивує патогенні бактерії. Бактерії, що викликають захворювання в організмі людини ($\sim 37^\circ\text{C}$), здебільшого є мезофільними, тобто вони можуть рости в діапазоні середніх температур $10\text{--}45^\circ\text{C}$ [1]. Таким чином, інактивація SODIS мезофільних бактерій, таких як колі-форми, прискорюється, коли сонячне нагрівання підвищує температуру очищеної води за межі цього діапазону вище 45°C [2, 3] або 50°C [4-6]. Це пояснюється тим, що коли температурний максимум бактерії перевищено, починається денатурація білків і зрештою пошкоджуються інші важливі клітинні структури, що може призвести до загибелі клітини [1]. Wegelin et al. (1994) [4] помітили, що якщо температура води залишається вище 50°C під час інактивації SODIS колі-форм, доза ультрафіолетового випромінювання для такого ж ступеня дезінфекції, стає втричі нижчою порівняно з SODIS при температурах від 20 до 40°C . Ці автори також показали, що на ентерококи не впливала температура води нижче 55°C . Необхідна доза ультрафіолетового випромінювання для певного рівня дезінфекції була зменшена вдвічі порівняно з нижчими температурами в їх дослідженні. Подібним чином Vivar et al. [3] виявили, що кінетика дезінфекції SODIS ентерококів

і *E. coli* не змінювалася, коли температура води залишалася між 15 °C і 40 °C. Вони також відзначили, що температури від 40 °C до 45 °C, близькі до оптимуму цих бактерій, можуть фактично перешкоджати ефективності SODIS, тобто мають антагоністичну дію. Giannakis та ін. [7] так само виявили, що змодельований SODIS *E. coli* сповільнюється, коли температура піднімається від 20 °C до 40 °C, причому інактивація є найменш ефективною при 40 °C серед досліджуваних температур (20–60 °C). Цей причинно-наслідковий зв'язок, ймовірно, пов'язаний зі швидкістю метаболізму бактерій і, отже, відновленням пошкоджень бактеріями від УФ-випромінювання (фоторепарація), яка є найшвидшою за оптимальних температур [7].

Цілком імовірно, що температури, нижчі або близькі до мінімумів, що сприяють росту бактерій, можуть так само спричинити синергетичний дезінфікуючий ефект разом із радіацією. Відомо, що комбінований вплив холодних температур (< 15 °C) і радіації на пошкодження мікроорганізмів широко не вивчався. Rincón і Pulgarin [8] зауважили, що сприйнятливість *E. coli* до фотокаталітичної обробки зростала в зимових умовах (вода 6–10 °C). García-Fernández et al. [9] та Vivar et al. [10] додатково вивчали SODIS при температурі води ~15 °C. Крім того, у модельних експериментах SODIS із видами *Pseudomonas*, *Aeromonas* і *Enterobacter*, посиленних перекисом водню, кращі результати отримані у фінських умовах холодної води та низької інтенсивності радіації (5–7 °C, 13 Вт/м²) порівняно з іспанськими умовами (31–32 °C, 44 Вт/м²) [11]. Однак, ефекти простого SODIS у воді з температурою нижче 15 °C не були ретельно вивчені. Якщо SODIS виявиться ефективним і відносно швидким у прохолодному кліматі, це зробить метод потенційно доступним для мільйонів нових домогосподарств з низьким рівнем доходу в кліматичних зонах з холодним або помірним сезоном.

Потенційні місця для застосування SODIS можна знайти, наприклад, у регіоні Гімалаїв і в більш прохолодних південних частинах Південної Америки. В даний час SODIS вважається неефективним у помірному, субполярному та полярному кліматі. Наприклад, Moreno-SanSegundo et al. [12] оцінюють, що застосування SODIS є сумнівним у регіонах із відносно низькими температурами та низьким УФ-випромінюванням. Borde et al. [13] також стверджують, що SODIS, особливо у більшій ємності на кілька літрів, є перспективним недорогим рішенням для очищення питної води в умовах низького доходу та стихійних лих, але вони вказують холодну погоду як одну з можливих проблем для його ефективності.

Деякі пов'язані звіти також підтверджують потенціал ПЕ (поліетиленового) мішка SODIS як простого в розповсюдженні, недорогого, короткострокового рішення для очищення питної води в ситуаціях катастроф і стихій [14, 15]. Поліетиленові пакети також краще піддаються дезінфекції, ніж звичайні ПЕТ (поліетилентерефталатні) пляшки [15, 16]. Нарешті, ПЕ-мішки були визнані безпечними для SODIS через низьку хімічну реакційну здатність матеріалу. Наприклад, після дванадцяти тижнів щоденного використання SODIS у поліетиленових пакетах Danwittayakul et al. [17] виявили, що рівні вилуговування органічних сполук значно нижчі за офіційні межі безпеки.

З вищеописаних причин метою дослідження [18] було дослідити ефективність SODIS у прохолодному кліматі. Хоча потенційні сфери домашнього застосування знаходяться в країнах з низьким рівнем доходу, автори вирішили перевірити ефективність SODIS у холодному вологому континентальному (помірному) кліматі південної Фінляндії. Під час експериментів цього дослідження джерельна вода, забруднена «дикими» фекальними бактеріями, піддавалася впливу природного сонячного світла в поліетиленових паке-

тах при різних природних температурах. Згодом було вивчено можливе виживання та відновлення бактерій, які зазнали впливу SODIS. Ряд експериментів із таким же експериментальним дизайном також проводився в середземноморському (субтропічному) кліматі Іспанії. Ці експерименти були проведені, щоб мати можливість порівняти доцільність застосування SODIS у холодному кліматі та в умовах, у яких він зазвичай застосовується, шляхом порівняння часу та дози, необхідних для дезінфекції. Також було досліджено вплив температури води на дезінфекцію за відсутності сонячної радіації, тобто у темряві (темнові тести). Крім того, були оцінені витрати на використання поліетиленового мішка SODIS при очищенні води в побутових умовах.

Тестовою водою, яка використовувалася в усіх експериментах, була куплена в магазині джерельна вода, інокульована міськими стічними водами відповідно до рекомендацій ВООЗ з оцінки очищення води в домашніх умовах. Стічні води, що використовуються як джерело диких фекальних бактерій, були отримані з очисних споруд Віїкінмякі або Пуерто-Реаль у Фінляндії та Іспанії відповідно. «Дикі» місцеві бактерії були обрані для проведення експериментів SODIS у більш реалістичних умовах. Щоб отримати тестову воду для експериментів SODIS, суміш джерельної води та відфільтрованої (25 мкм) стічної води (0,1–1% об'єм/об'єм) готували таким чином, щоб початкові концентрації загальних коліформ і ентерококів становили приблизно 10^5 КУО в 100 мл готової проби.

Експерименти у вологому континентальному (помірному) кліматі проводилися в Університеті Аалто (Отаніємі, південна Фінляндія) протягом березня – квітня 2019 р. та березні 2021 р. Експерименти у середземноморському (субтропічному) кліматі проводилися в університеті Кадіс (Пуерто-Реал), південна Іспанія у квітні 2019 року.

ПЕТ-пляшки є найбільш часто використовуваними посудинами для SODIS [14]. Однак для всіх експериментів цього дослідження були обрані комерційні поліетиленові пакети (ємністю 1 л, товщиною пластикової стінки 0,05 мм), оскільки вони також використовуються в побутових SODIS. Цей вибір був зумовлений високим коефіцієнтом пропускання UVB-випромінювання на відміну від ПЕТ-пляшок із низьким коефіцієнтом пропускання UVB-променів.

У всіх експериментах SODIS заповнені водою поліетиленові пакети розміщували рядами під прямим сонячним світлом. Загальна тривалість цих експериментів становила 6 годин у Фінляндії та 4 години в Іспанії. Під час кожного відбору зразків один поліетиленовий мішок знімався з сонячного світла для культивування бактерій і реєструвалися температура повітря, температура води та інтенсивність радіації. Температуру повітря вимірювали термометром, покладеним біля мішків. Для вимірювання температури води використовувався термометр, поміщений у наповнений водою поліетиленовий пакет, ідентичний зразкам. Об'єм тестової води в кожному поліетиленовому мішку становив 500 мл, що забезпечувало до 16 мм \pm 2 мм товщини шару води в мішках у положенні лежачи під час експериментів.

Експерименти SODIS проводилися на двох різних дахах. Матеріалами покрівлі були невідбиваюча композиційна черепиця (Фінляндія) та кам'яна галька (Іспанія). Можливі відмінності теплопередачі матеріалів покрівлі були враховані шляхом відстеження температури води. Сніг був видалений із зони експерименту перед експериментом у березні 2021 року, проведеним у Фінляндії, щоб він не змінив теплообмін і відбивні властивості даху.

Інтенсивність сонячного випромінювання вимірювалася радіометром General Tools (UV513AB) у Фінляндії та додатково вимірювачем Kipp & Zonen Meteor Irradiance (CUV 5)

в Іспанії. Спектральний діапазон в обох становив 280–400 нм. Корируючий коефіцієнт, розрахований на основі різниць вимірювань між радіометрами, застосовувався до вимірювань радіометра General Tools. Доза сонячного випромінювання була розрахована на основі формули, представлені Gutierrez-Alfaro et al. [15]:

$$Q_{UV} = Q_{UV-1} + UV_n \cdot t_n - t_{n-1},$$

де Q_{UV} — кумулятивна доза в точці відбору n , Q_{UV-1} — кумулятивна доза в точці відбору $n - 1$, UV_n — інтенсивність УФ-випромінювання у точці відбору проб n , t_n — час у годинах у точці відбору проб n , а t_{n-1} — час у годинах у точці відбору проб $n-1$.

Бактерії з мішків із зразками з кожного моменту часу культивували за допомогою методу мембранної фільтрації в чотирьох повторях. Крім того, один мішок, який піддавався впливу сонячного світла протягом усього експерименту, зберігався за відсутності світла при кімнатній температурі ($20\text{ }^\circ\text{C} \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$) протягом 24 годин після кожного експерименту. Мембранну фільтрацію згодом використовували для реєстрації можливої реактивації бактерій після SODIS.

Відсоток реактивації розраховували за формулою, представленою Lindenauer and Darby [19]:

(2) реактивація% = $100\% \cdot N_t - N / N_0 - N$, де N_t є концентрацією бактерій після 24-годинного часу реактивації (КУО/100 мл), N — концентрація в кінці експерименту (КУО/100 мл), а N_0 — початкова концентрація перед експериментом (КУО/100 мл).

4.1 Контрольні дослідження за відсутності сонячної радіації

Щоб вивчити єдиний вплив температури води на ентерококи та загальну кількість колі-форм, тестову воду, ідентичну

тій, що використовувалася в експериментах SODIS, піддавали впливу різних температур без впливу сонячного світла протягом тих самих або трохи довших періодів часу порівняно з експериментами SODIS. Спочатку джерельну воду попередньо нагрівали або охолоджували до 0 °С, 10 °С, 20 °С або 43 °С у поліетиленових пакетах у термостатах при цих температурах або в холодильнику при 4 °С. Температуру вимірювали на початку перед додаванням стічної води та в кожену точку часу відбору за допомогою термометра в поліетиленовому пакеті, ідентичному мішкам для зразків. На початку експериментів стічні води додавали в попередньо нагріті/охолоджені мішки з джерельною водою до досягнення концентрації 1%, а зразки в мішках ретельно перемішували. Згодом пакети негайно повертали в термостат або холодильник із заданою температурою. Пакет із зразком при 0 °С зберігали на льоду в холодильнику, а пакет із зразком при 20 °С зберігали при кімнатній температурі (20 °С ± 1 °С). Культивування бактерій проводили ідентично дослідом SODIS.

Метод мембранної фільтрації використовувався для аналізу зразків усіх експериментів. Зразки висівали в чотирьох повторах, за винятком того, що зразки, у яких межа виявлення була близькою, і зразки з темних тестів висівали у двох повторах. Кількісне визначення колоній проводили після інкубації протягом 24 годин (загальна кількість колі-форм) або 48 годин (ентерококи) при 37 °С. Бактеріальні колонії підраховували відповідно до інструкцій щодо підрахунку колоній відповідних виробників середовищ.

Результати SODIS і темного тесту представлені у вигляді логарифмічної зміни концентрації ($\log [N/N_0]$) як функція часу (хв) та/або дози (Вт·год/м²). Початкова концентрація бактерій позначена N_0 , а концентрація в момент часу t позначена N . Результати були підігнані до лінійних моделей виживання мікробів за допомогою програмного забез-

печення GInaFiT, розробленого Geeraerd et al. [20]. Використання лише лінійних моделей було вибрано, щоб уникнути надмірної підгонки даних до більш складних моделей і мати можливість порівнювати криві дезінфекції між собою.

Три найкращі лінійні моделі, доступні в програмному забезпеченні, були логарифмічно-лінійні + плече, логарифмічно-лінійні + хвіст і логарифмічно-лінійні + плече та хвіст. З цих варіантів для кожної кривої інактивації була обрана модель з найменшим RMSE і найвищим значенням R2. Крім того, дози, необхідні для 2-log і 4-log інактивації, а також час для досягнення 4-log інактивації були розраховані за допомогою програмного забезпечення GInaFiT.

4.2 Умови проведення дослідів SODIS та склад джерельної води

Протягом експериментів погода була переважно сонячною. Жодного замерзання пакетів для зразків не спостерігалося.

Джерельна вода (99% об./об. у тестовій воді), яка використовувалася в Іспанії, була дещо жорсткішою, ніж вода, яка використовувалася у Фінляндії. Недавня стаття Rommozzi et al. [21] описує, як на SODIS впливають різні іони в їх типових концентраціях для природних вод, таких як озера та річки. Вони повідомляють, що серед іонів, знайдених у тестовій воді в даному дослідженні, NO_3^- (≥ 30 мг/л), NO_2^- ($\geq 0,1$ мг/л) та Cl^- (≥ 10 мг/л) можуть підвищувати SODIS *E. coli* у відповідних концентраціях, тоді як SO_4^{2-} не мав ефекту навіть при найвищій дослідженій концентрації (500 мг/л). Отже, у цих експериментах джерельна вода, яка використовувалася в Іспанії, могла незначно прискорити SODIS порівняно з водою, яка використовувалася у Фінляндії. Це пов'язано з тим, що іспанська джерельна вода мала вищі

концентрації NO_2^- і Cl^- , ніж відповідні значення, встановлені Rommozzi et al.

4.3 Ефективність SODIS у вологих континентальних і середземноморських кліматичних зонах

Ці експерименти проводилися в локальних експериментальних умовах, які є природними в обох місцях, включаючи місцеву температуру, сонячне опромінення, а також фізичні, хімічні та мікробіологічні характеристики води. Таким чином, результати, отримані в кожному місці, не можна прямо порівняти один з одним. Однак вони свідчать про доцільність застосування SODIS в обох місцях, оскільки експерименти проводилися в реальних умовах.

Межа виявлення (LOD) <1 КУО/100 мл була досягнута в усіх експериментах для колі-форм і в половині експериментів для ентерококів. Інактивація 4-log обох бактерій була досягнута в усіх експериментах. Це означає, що SODIS як побутовий метод очищення води мав високий захисний ефект проти загальних колі-форм і ентерококів у всіх умовах експерименту.

4.3.1 Повна інактивація колі-форм за допомогою SODIS

Результати загальної інактивації колі-форм SODIS, отриманої у Фінляндії та Іспанії за різних природних температур води та інтенсивності сонячного випромінювання, найкраще підходять для моделі з плечем. Це може вказувати на те, що популяції виявляють певний рівень резистентності до низьких доз, отриманих на початку експериментів. Хвости на кривих вказують на присутність в експериментах деяких більш стійких до ультрафіолету субпопуляцій.

Ефективність загальної інактивації коліформ за допомогою SODIS була явно найвищою ($k_{\max} = 0,53 \text{ м}^2/\text{Вт}\cdot\text{год}$) в експерименті із середньою температурою води $8 \text{ }^\circ\text{C}$ і середньою інтенсивністю $19 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Хоча експериментальні результати, отримані у Фінляндії та Іспанії, нелегко порівняти, можна помітити, що експеримент High T & I ($k_{\max} = 0,21 \text{ м}^2/\text{Вт}\cdot\text{год}$, середня температура води $38 \text{ }^\circ\text{C}$, середня інтенсивність $42 \text{ Вт}/\text{м}^2$), проведений в Іспанії, показує набагато нижчу ефективність загальної інактивації коліформ щодо необхідної дози. Майже ідентична низька ефективність дезінфекції ($k_{\max} = 0,20 \text{ м}^2/\text{Вт}\cdot\text{год}$) також була отримана в експерименті Med T & Low I (середня температура води $17 \text{ }^\circ\text{C}$, середня інтенсивність $16 \text{ Вт}/\text{м}^2$). 4-log інактивація в експерименті Low T & Med I, проведеному у Фінляндії, була досягнута за допомогою дози ($25 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$), що становить менше половини дози ($53 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$), необхідної для експерименту High T & I, проведеного в Іспанії. На основі результатів Gutiérrez-Alfaro et al. [22], необхідна доза SODIS для 4-log зниження *E. coli* у джерельній воді становить $\sim 35 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ у поліетиленових пакетах (температура води $18\text{--}28 \text{ }^\circ\text{C}$, інтенсивність $20\text{--}35 \text{ Вт}/\text{м}^2$). Про експерименти із іншими колі-формами, окрім *E. coli*, при використанні поліетиленового пакету SODIS, не повідомлялося.

Ключовим параметром, який слід брати до уваги при оцінці ефективності SODIS, є експериментальний час, необхідний для досягнення 4-log дезінфекції. Експериментальний час слід розглянути особливо при розгляді випробувань SODIS, проведених у Фінляндії та Іспанії, оскільки джерело стічної води та експериментальні умови (інтенсивність сонячного світла, температура води та повітря) істотно відрізнялися. Цікаво, що час, необхідний для 4-log дезінфекції, дуже схожий в експериментах Low T & Med I (1 год 27 хв) і High T & I (1 год 24 хв). Це дивно, оскільки середня інтенсивність

експерименту High T & I (42 Вт/м², Іспанія) була набагато вищою на відміну від експерименту Low T & Med I (19 Вт/м², Фінляндія). Крім того, ці два експерименти значно швидше досягають 4-log загальної дезінфекції від колі-форм порівняно з двома іншими експериментами із середніми температурами та низькою та середньою інтенсивністю.

Як зазначалося раніше, приблизні мінімальна, оптимальна та максимальна температури *E. coli* та інших фекальних колі-форм становлять 8 °С, 39 °С та 48 °С відповідно [1]. Таким чином, температура води в експерименті High T & I (максимальна 41 °С, середнє значення 38 °С) дуже близька до оптимуму фекальних колі-форм. Це може пояснити, чому значення k_{\max} загальної інактивації кишкової палички в експерименті High T & I є відносно низьким, а інактивація 2-log і 4-log вимагає найвищих доз з усіх експериментів. Подібним чином Vivar et al. [3] виявили, що SODIS (середня інтенсивність 45 Вт/м²) *E. coli* у відфільтрованих стічних водах сповільнилися, коли температури експерименту залишалися між 40 °С і 45 °С. Giannakis та ін. [7] також повідомили про подібні результати під час вивчення впливу температур від 20 °С до 60 °С на SODIS (сумарна сонячна інтенсивність 800 Вт/м² і 1200 Вт/м²) *E. coli* у синтетичних вторинних стоках: дезінфекція була найслабша при 40 °С. Природно, порівняно з даною тестовою водою, вміст поживних речовин значно відрізнявся в синтетичних матрицях стічних вод, які використовували Giannakis et al. [7] та Vivar et al. [3]. Таким чином, підвищення росту може пояснити деякі антагоністичні ефекти в їхніх експериментах, оскільки температура залишалася близькою до оптимальної для колі-форм.

Загалом швидкість інактивації дещо зросла, коли температура в експериментах знизилася (за винятком експерименту Med T & Low I), але дози також були різними в кожному експерименті. Тому однозначно виділити вплив темпера-

тури води на досліди важко. Villar-Navarro et al. [11] нещодавно отримали подібні результати при вивченні посиленого перекисом водню SODIS видів *Pseudomonas*, *Aeromonas* і *Enterobacter* змодельованих водних потоків у фінських (5–7 °C, 13 Вт/м²) та іспанських (31–32 °C, 44 Вт/м²) умовах. Вони помітили, що у Фінляндії 4-log дезінфекція була досягнута з нижчою дозою сонячного випромінювання 25 Вт·год/м² (32 Вт·год/м² в Іспанії), а значення k_{\max} було майже вдвічі меншим порівняно з тим, що спостерігалось в умовах Іспанії. Ті ж дослідники також помітили подібну тенденцію з тестами UVA та фотокаталізу, посиленого перекисом водню, а також простими тестами фотокаталізу: дезінфекція була досягнута меншою дозою при 6 °C порівняно з 22 °C.

Нижчі необхідні дози в холодних експериментах, проведених у Фінляндії, могли бути спричинені уповільненням метаболізму, спричиненим холодом, через посилення мембрани [1] і зниження виробництва білків для метаболізму [23]. Обидва ці механізми можуть уповільнити фоторепарацію клітин при низьких температурах. Найкращу продуктивність експерименту Low T & Med I можна пояснити тим фактом, що це єдиний експеримент із температурою, переважно нижчою від кардинального температурного мінімуму кишкових колі-форм, і, отже, процеси фоторепарації могли бути близькими до нормальних. Можна стверджувати, що експеримент Med T & Low I забезпечив найменш ефективні умови для SODIS з точки зору часу, оскільки інтенсивність була низькою, а температура води недостатньо високою або низькою, щоб перешкоджати функціонуванню бактерій.

4.3.2 Інактивація ентерококів методом SODIS

Загалом SODIS був менш ефективним в інактивації ентерококів порівняно з більш чутливими до ультрафіолетового

випромінювання загальними колі-формами за всіх досліджуваних температур, як у вологих континентальних, так і в середземноморських кліматичних зонах, що узгоджується з іншими дослідженнями [4, 22, 24]. Ця відмінність між дезінфікуючими дозами ультрафіолетового опромінення, ймовірно, пов'язана з тим, що грампозитивні бактерії, такі як ентерококи, мають товстішу та міцнішу клітинну стінку порівняно з грамнегативними бактеріями, такими як кишкова паличка [8, 25, 26].

Більша довжина плеча кривої ентерококів в експерименті High T & I порівняно з колі-формами в тому самому експерименті є одним із інших факторів, які вказують на те, що ентерококи більш стійкі до УФ-променів порівняно з загальними колі-формами. Подібно до загальних колі-форм, найнижчу дозу, необхідну для 4-log дезінфекції (60 Вт·год/м²), було отримано в експерименті Low T & Med I (Фінляндія, середня температура води 11 °С, середня інтенсивність 18 Вт/м²), тоді як відповідна набагато вища, найбільша доза (108 Вт·год/м²) була потрібна в експерименті High T & I (Іспанія, середня температура води 39 °С, середня інтенсивність 42 Вт/м²). Тут слід зазначити, що час досягнення 4-log інактивації був найкоротшим (2 години 40 хвилин) в експерименті High T & I, проведеному в Іспанії, який мав явно найвищу середню інтенсивність УФ. Однак 4-логічна дезінфекція в експерименті Low T & Med I була лише на 38 хвилин повільнішою, що додатково вказує на високу ефективність SODIS навіть у холодних умовах.

Gutiérrez-Alfaro et al. [15] та Figueredo-Fernández et al. [26] повідомили, що для 2-log інактивації ентерококів за допомогою SODIS у поліетиленових пакетах потрібна доза приблизно 90 Вт·год/м². Відповідні температури води та сонячна інтенсивність у цих дослідженнях, також проведених у Кадісі (Іспанія), становили 18–28 °С і 20–35 Вт/м² (15) і 41 °С

і 30–50 Вт/м² [26]. Подібно до даного дослідження [18], у вищезазначених роботах використовувалися бідні на поживні речовини водні матриці (бутильована джерельна вода, колодязна вода, водопровідна вода), які були засіяні стічними водами. У даному дослідженні [18] найбільш подібна доза, необхідна для 2-log інактивації ентерококів (68 Вт·год/м²), була отримана в експерименті High T & I (Іспанія). Це трохи нижче порівняно з раніше згаданими дослідженнями, але воно попадає в стандартне відхилення, отримане з трьох експериментів у Figueredo-Fernández et al. [26]. І навпаки, відповідні 2-log інактивуючі дози інших даних експериментів, усі з яких проводилися у Фінляндії, становили лише третину або половину від того, що спостерігали Gutiérrez-Alfaro et al. і Figueredo-Fernández et al. Відповідні мінімальна, оптимальна та максимальна температури ентерококів, розраховані за допомогою моделі Rosso, складають приблизно 7 °C, 43 °C та 48 °C відповідно [27]. Ці температури можуть пояснити, чому найвищі дози для 2-log і 4-log інактивації ентерококів були отримані в експерименті з найвищою температурою води (середня температура 39 °C), тобто в експерименті High T & I (Іспанія). Імовірно, такий результат пов'язаний з тим, що ентерококи досягають високої швидкості метаболізму, захищаючи їх від УФ-пошкодження при температурі води експерименту, оскільки вона дуже близька до їхнього температурного оптимуму. Нижчі дози, необхідні для 4-log дезінфекції (60 Вт·год/м², 68 Вт·год/м² і 83 Вт·год/м²), були отримані в усіх експериментах, проведених у Фінляндії. Причина, по якій експеримент Med T & Low I показав найгірші результати серед експериментів SODIS, проведених у Фінляндії як щодо необхідної дози, так і часу, ймовірно, пов'язана з тим, що він мав найнижчу середню інтенсивність із трьох (12 Вт/м²). Інтенсивність експерименту Low T & Med I не набагато вища (18 Вт/м²), але його температура нижче або дуже близька до

кардинального мінімуму ($< 7\text{ }^{\circ}\text{C}$) протягом більшої частини експерименту. Вірогідно, як і у випадку загальної кількості колі-форм, низька температура, близька до температурного мінімуму ентерококів, повинна була настільки уповільнити їхній метаболізм, щоб зробити їх менш здатними протистояти УФ-пошкодженню в цьому експерименті.

Деякі характеристики можуть додатково пояснити відмінності у виживаності ентерококів у різних експериментах SODIS. По-перше, деякі звіти вказують на те, що оптимальна температура для росту бактерій не завжди може бути оптимальною для їхнього виживання [28]. Lessard і Sieburth [29], наприклад, помітили, що кишкова паличка та ентерококи в суміші стічних вод і морської води в дифузійних камерах з оргскла, розміщених на відкритому повітрі з лютого по серпень ($0\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$), найкраще виживали при низьких температурах. Крім того, згідно з деякими дослідженнями, холодостійкість розвивається у ентерококів, якщо вони інкубуються при низьких плюсових температурах ($8\text{--}16\text{ }^{\circ}\text{C}$), і ця толерантність збільшується, якщо тривалість цього інкубаційного періоду подовжується [30].

4.3.3 Реактивація бактерій після експериментів SODIS

Величина та швидкість реактивації бактерій після SODIS визначає, як довго можна зберігати очищену воду, перш ніж вона знову стане непридатною для пиття. Реактивація через 24 години після всіх експериментів SODIS у нашому дослідженні залишалася нижче дуже низького значення $0,3\%$. Не дивно, що найнижча реактивація загальних коліформ і ентерококів відбулася в експериментах з найвищими отриманими загальними дозами. Після експериментів SODIS високої High T & I (загальна доза $165\text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$), середньої Med T

& I (загальна доза 109 Вт·год/м²) і низької Low T & Med I (загальна доза 86 Вт·год/м²) інтенсивності, спостерігалось 0,001%, 0% і 0% реактивації відповідно. Ці дози, очевидно, були достатніми, щоб незворотно пошкодити бактеріальні структури, які неможливо відновити, і дуже мало бактерій, які можна культивувати, вижили. І навпаки, межа виявлення ентерококів не була досягнута в експерименті Med T & Low I (загальна доза 81 Вт·год/м²). Таким чином, певна реактивація ентерококів, ймовірно, відбулася в тесті на реактивацію. Вірогідно, що низька інтенсивність і нешкідлива температура води в експерименті додатково дозволили спостерігати незначну фоторепарацію ентерококів і загальних колі-форм.

Levchuk et al. [31] повідомили про значно вищу (< 5%) реактивацію загальної кількості колі-форм і ентерококів після подібної дози SODIS (76 Вт·год/м²) порівняно з експериментами Low T & Med I і Med T & Low I. Як і в цьому дослідженні, вони використовували бутильовану питну воду, інокульовану стічними водами, як водну матрицю, і їхні експерименти також проводилися в Кадісі. У цьому дослідженні реактивація загальних колі-форм відбулася в експерименті Med T & Low I (81 Вт·год/м²), але не в експерименті Low T & Med I з дуже подібною дозою (86 Вт·год/м²). Вірогідно, фоторепарація не відбулася, оскільки температура води була близькою або нижчою від кардинальної температури колі-форм (~8–48 °C) [1] та ентерококів (~7–48 °C) [23] в експерименті Low T & Med I (6–14 °C). Як описано вище, метаболічні функції бактерій могли бути настільки пошкоджені холодом [1, 23], що бактерії не могли протистояти УФ-пошкодженню під час обробки SODIS. Цей механізм, ймовірно, сприяв тому, що жодна бактерія не вижила в експерименті Low T & Med I (середня температура води 11 °C для ентерококів), тоді як, навпаки, більш комфортна середня температура (15 °C для ентерококів) експерименту Med T & Low I забезпечила вищий

ступінь відновлення клітин (фоторепарацію), і, отже, кілька бактерій вижили. Іншою можливою причиною реактивації загальних колі-форм в експерименті Med T & Low I є те, що початкові відповідні концентрації загальних коліформ і ентерококів були на $\sim 0,8 \log$ і $\sim 1,7 \log$ більшими, ніж у експерименті Low T & Med I. Тим не менш, Giannakis et al. [7] виявили, що початкові концентрації були незначними з точки зору ефективності SODIS у подібних експериментах.

Отримані колонії реактивації в експерименті High T & I SODIS (Іспанія), які отримали найвищу дозу ($165 \text{ Вт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$), секвенували. Виявилося, що ці колонії містять *Acinetobacter spp.* з генетичним збігом 96%. Резистентність до сонячної радіації грамнегативних *Acinetobacter spp.* не вивчалась в дослідженнях SODIS, але цей рід був визнаний досить стійким до UVB порівняно з іншими бактеріями, що підтверджують Zenoff et al. [32]. Автори також відзначили, що види цього роду можуть розвивати та виконувати ефективні механізми фоторепарації після впливу ультрафіолету. Для порівняння, Santos et al. [33] виявили, що рід чутливий до УФ-променів, але вони припустили, що *Acinetobacter spp.* можуть розвивати резистентність до УФ-променів залежно від рівня їх впливу у середовищі існування.

4.3.4 Термічний контроль бактеріальної інактивації: 0 °C, 10 °C і 20 °C тести в темряві

Експериментальний час і температури для цих тестів у темряві були вибрані з урахуванням температурних діапазонів і часових проміжків експериментів SODIS, проведених у Фінляндії. Не спостерігалось значної інактивації ані ентерококів, ані загальних колі-форм у тестах у темряві при 0 °C, 10 °C або 20 °C протягом періоду експерименту 6 годин 30 хвилин (390 хвилин). Усі концентрації бактерій залишали-

ся в межах $\pm 0,5 \log$ від початкових концентрацій. Температура $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ тесту в темряві знаходилася в межах кардинальних діапазонів кишкової палички та ентерококів, тоді як температура $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в темряві близька до температурних мінімумів обох бактерій. Однак, оскільки в умовах експериментів немає додаткового джерела стресу для бактерій, суттєвих змін їх концентрації в жодному з темнових тестів не відбувається. Під час випробування в темряві при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ обидві бактерії, очевидно, змогли підтримувати рівень основного метаболізму, і, отже, вони не були інактивовані навіть у цьому експерименті. Таким чином, дезінфекція в експерименті SODIS із найнижчим температурним діапазоном у цьому дослідженні ($6\text{--}14\text{ }^{\circ}\text{C}$, експеримент Low T & Med I) зумовлена пошкодженням УФ-променями, а не охолодженням бактерій до інактивації, як можна було підозрювати. Тим не менш, як згадувалося раніше, низькі температури можуть опосередковано прискорити дезінфекцію шляхом уповільнення метаболічних функцій [1, 23], що робить бактерії менш здатними відновлювати пошкодження УФ-променями. Зниження температури спочатку викликає уповільнення ферментативних реакцій і, таким чином, швидкість метаболізму знижується. Це пов'язано з посиленням цитоплазматичної мембрани мікроорганізму, що перешкоджає транспорту поживних речовин і протонів до клітини та з неї. Функції багатьох клітин дедалі більше порушуються, оскільки температура знижується та відбувається посилення мембрани. Цей процес перешкоджає росту, але не інактивує мікроорганізм [1].

4.3.5 Термічний контроль бактеріальної інактивації: тест у темряві при $43\text{ }^{\circ}\text{C}$

Експериментальний час і температуру цього темнового тесту було вибрано так, щоб відповідати максимальній

температурі (43 °С) і часовому проміжку (4 години) експерименту High T & I, який проводився в Іспанії з місцевими стічними водами і джерельною водою.

У цьому темновому тесті суттєва інактивація загальної кількості колі-форм (~2,6 log) спостерігалася через 4 години (240 хвилин). Це дещо несподівано, оскільки відповідні мінімальна, оптимальна та максимальна температури *E. coli* та інших фекальних (тобто терmostійких) колі-форм становлять приблизно 8 °С, 39 °С та 48 °С відповідно [1]. У цьому експерименті їхня оптимальна температура перевищена; тим не менш це не є їх максимальна температура. Таким чином можна очікувати невеликі пошкодження структур бактеріальних клітин [1]. Проте вже відомо, що температура 45 °С має синергічний ефект з УФ-випромінюванням на деякі колі-форми під час застосування SODIS [2, 3]. Отримані результати [18] показують, що цей синергетичний ефект може початися при дещо нижчій температурі, ніж спостерігалось раніше. Ubomba-Jaswa et al. [34] також отримали результати, подібні до цього дослідження. Вони спостерігали зниження концентрації *E. coli* у природній колодязній воді приблизно на 1,5 логарифма за 1,5 години під час темного тестування води при 45 °С. Giannakis et al. [7] також виявили, що не було різких змін у концентраціях *E. coli* у синтетичних вторинних стоках, коли температура залишалася між 20 °С і 40 °С протягом 4 годин. Тим не менш, при 50 °С 3-log інактивація *E. coli* відбулася через 2,5–3 години. Іншим додатковим поясненням помітної дезінфекції загальної кількості коліформ у даному дослідженні [18] може бути те, що інактивована субпопуляція колі-форм не складалася з термотолерантних.

Навпаки, тест у темряві при температурі 43 °С викликав менш ніж 0,25-log інактивацію в ентерококах. Ця температура відповідала їхньому оптимуму, ~43 °С [23], тому вони розмножуються в умовах експерименту. Ентерококи вважа-

ються певною мірою терmostійкими і сильний синергічний ефект випромінювання та тепла, ймовірно, значний лише при температурах, що перевищують 55 °C [4].

4.4 Попередня оцінка вартості SODIS в поліетиленових пакетах

В цьому дослідженні були оцінені річні витрати домогосподарства на використання поліетиленових мішків як посудин SODIS для очищення води, щоб визначити, наскільки вони економічно життєздатні при повсякденному використанні. Ці витрати включають витрати на придбання та річну експлуатацію для потреб питної води для сім'ї з чотирьох осіб. Поліетиленові пакети, використані в цьому дослідженні, як описано раніше, мали ємність один літр і були наповнені на 50%, тобто містили 500 мл води. Ці мішки використовувалися для цілей цього дослідження, але сім'ї могли використовувати повністю заповнені більші мішки, щоб зробити SODIS більш зручним. Було доведено, що більші контейнери, навіть із набагато товщим шаром води, мають подібну дезінфекційну ефективність порівняно з меншими [35]. Швидка дезінфекція все ще може бути досягнута за допомогою поліетиленових пакетів після п'яти місяців використання [15]. Пакети, які використовувалися в цьому дослідженні, являли собою комерційні багатоцільові поліетиленові пакети, які можна було придбати у фінському супермаркеті за 0,08 євро за штуку.

Порівняно з Фінляндією поліетиленові пакети дешевші в Індії, Гані та в Інтернеті. Їх щоденне використання також дешевше порівняно з ПЕТ-пляшками, які широко доступні в країнах з низьким рівнем доходу. З іншого боку, під час проведення експериментів у цьому дослідженні поліетиленові пакети іноді ламаються через шви. Крихкість поліетиленових

пакетів у застосуванні SODIS також помітили Gutiérrez-Alfaro та ін. [15] і, отже, це може створити проблему для домашнього використання, навіть якщо вони можуть бути дуже недорогими (~0,3 євро/рік/сім'я). Крім того, як згадувалося раніше, поліетиленові пакети є більш ефективними в SODIS порівняно з ПЕТ-пляшками, оскільки вони не поглинають UVB-промені [15, 16].

У підсумку автори [18] зазначають наступне.

У всіх експериментах SODIS яку вологій континентальній, так і в середземноморській кліматичній зонах була досягнута інактивація принаймні на 4-log (> 99,99%) ентерококів і загальних колі-форм. Крім того, реактивація бактерій у темряві після кожного експерименту SODIS була незначною (>0,3%) протягом усього експерименту. Вперше продемонстрована хороша ефективність SODIS у найхолодніших умовах цього дослідження (середня температура води 8–11 °C). На відміну від попередніх тверджень ці результати підтверджують висновки BOOZ [36] щодо ефективності SODIS також у вологому континентальному кліматі. Ефективність SODIS у цих умовах проти вірусів і найпростіших ще потребує вивчення в майбутніх дослідженнях.

Навіть якщо нижчі дози були потрібні для будь-якого рівня дезінфекції в експериментах, проведених у вологому континентальному кліматі, той самий рівень дезінфекції здебільшого досягався швидше в умовах експерименту, проведеного в середземноморському кліматі. Ймовірно, це було пов'язано зі значно вищою інтенсивністю ультрафіолетового випромінювання в останньому. Проте дезінфекція 4-log колі-форм була досягнута однаково швидко (приблизно за 1,5 години) в експерименті з найхолоднішою середньою температурою води, проведеному у вологому континентальному кліматі, як і в експерименті, проведеному в середземноморському кліматі. Інактивація ентерококів також

була майже такою ж швидкою в найхолодніших умовах, як і в Іспанії. Висока швидкість дезінфекції в експерименті з найхолоднішою середньою температурою води додатково підкреслює ефективне застосування SODIS в холодних умовах.

Результати свідчать про те, що може існувати синергетичний ефект між низькими температурами та SODIS, оскільки з точки зору необхідної дози дезінфекція кишкової палички та ентерококів значно прискорилося зі зниженням температури експериментів. Це можна пояснити повільнішим метаболізмом і, отже, повільнішими механізмами відновлення УФ-променів у мезофільних бактерій при низьких температурах, особливо якщо температура падає нижче або близько до мінімальних температур для розмноження.

Література

1. Madigan M.T. Brock Biology of Microorganisms (15th edition, Global edition), Pearson, New York (2017). PP. 89-92 188-189
2. Solar disinfection of drinking water contained in transparent plastic bottles: characterizing the bacterial inactivation process. K.G. McGuigan et al. J. Appl. Microbiol. 1998. V. 84 (6). P. 1138-1148.
3. Vivar M., Pichel N. , Fuentes M. Solar disinfection of natural river water with low microbiological content (10–103 CFU/100 ml) and evaluation of the thermal contribution to water purification. Sol. Energy. 2017. V.141. P. 1-10.
4. Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. M. Wegelin et al. Aqua. 1994. V. 43. P. 154-169.
5. SODIS-an emerging water treatment process. B. Sommer et al. Aqua(Oxford). 1997. V. 46 (3) P. 127-137.

6. Joyce T.M., McGuigan K.G. , Elmore-Meegan M., Conroy R.M. Inactivation of fecal bacteria in drinking water by solar heating. *Appl. Environ. Microbiol.* 1996. V. 62 (2). P. 399-402.
7. Giannakis S., Darakas E., Escalas-Cañellas A. , Pulgarin C. The antagonistic and synergistic effects of temperature during solar disinfection of synthetic secondary effluent. *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 2014. V. 280. P. 14-26.
8. Rincón A.G. , Pulgarin C. Field solar E. Coli inactivation in the absence and presence of TiO₂: is UV solar dose an appropriate parameter for standardization of water solar disinfection? *Sol. Energy.* 2004. V.77 (5). P. 635-648.
9. García-Fernández I. , Fernández-Calderero I., Polo-López M.I. , Fernández-Ibáñez P. Disinfection of urban effluents using solar TiO₂ photocatalysis: a study of significance of dissolved oxygen, temperature, type of microorganism and water matrix. *Catal. Today.* 2015. V. 240. P. 30-38.
10. Vivar M., Pichel N., Fuentes M., López-Vargas A. Separating the UV and thermal components during real-time solar disinfection experiments: the effect of temperature. *Sol. Energy.* 2017. V. 146. P. 334-341.
11. Inactivation of simulated aquaculture stream bacteria at low temperature using advanced UVA-and solar-based oxidation methods. E. Villar-Navarro et al. *Sol. Energy.* 2021. V.227. P. 477-489.
12. SODIS potential: a novel parameter to assess the suitability of solar water disinfection worldwide. J. Moreno-San Segundo et al. *Chem. Eng. J.* 2021. 129889.
13. Borde P., Elmusharaf K., McGuigan K.G., Keogh M.B. Community challenges when using large plastic bottles for solar energy disinfection of water (SODIS). *BMC Public Health.* 2016. V.16 (1). P. 931.

14. Solar water disinfection (SODIS): a review from bench-top to roof-top. K.G. McGuigan et al. *J. Hazard. Mater.* 2012. V. 235. P. 29-46.
15. Accelerating the process of solar disinfection (SODIS) by using polymer bags. S. Gutiérrez-Alfaro et al. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2017. V. 92(2). P. 298-304.
16. UV dosimetry for solar water disinfection (SODIS) carried out in different plastic bottles and bags. K. Lawrie et al. *Sensors Actuators B Chem.* 2015. V. 208. P. 608-615.
17. Safety and durability of low-density polyethylene bags in solar water disinfection applications. S. Danwittayakul et al. *Environ. Technol.* 2017. V.38(16). P. 1987-1996.
18. Solar disinfection – An appropriate water treatment method to inactivate faecal bacteria in cold climates. A. Juvakoski et al. *Science of The Total Environment.* 2022. V. 827. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154086>
19. Lindenauer K.G., Darby J.L. Ultraviolet disinfection of wastewater: effect of dose on subsequent photoreactivation. *Water Res.* 1994. V. 28 (4). P. 805-817.
20. Geeraerd A.H. , Valdramidis V.P. , Van J.F. Impe GInaFiT, a freeware tool to assess non-log-linear microbial survivor curves. *Int. J. Food Microbiol.* 2005. V.102(1). P. 95-105.
21. Detrimental vs. Beneficial influence of ions during solar (SODIS) and photo-Fenton disinfection of *E. coli* in water: (Bi) carbonate, chloride, nitrate and nitrite effects. E. Rommozzi et al. *Appl. Catal. B Environ.* 2020. 118877
22. Solar photocatalytic water disinfection of *Escherichia coli*, *Enterococcus* spp. and *Clostridium perfringens* using different low-cost devices. S. Gutiérrez-Alfaro et al. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2016. V.91(7). P. 2026-2037.
23. Jones P.G., VanBogelen R.A., Neidhardt F.C. Induction of proteins in response to low temperature in *Escherichia coli*. *J. Bacteriol.* 1987. V. 169(5). P. 2092-2095.

24. Solar photocatalytic disinfection using ink-jet printed composite TiO₂/SiO₂ thin films on flexible substrate: applicability to drinking and marine water. I. Levchuk et al. *Sol. Energy*. 2019. V. 191. P. 518-529.
25. Gomes A.I., Vilar V.J., Boaventura R.A. Synthetic and natural waters disinfection using natural solar radiation in a pilot plant with CPCs. *Catal. Today*. 2009. V.144 (1–2). P. 55-61.
26. Figueredo - Fernández M., Gutiérrez - Alfaro S., Acevedo-Merino A., Manzano M.A. Estimating lethal dose of solar radiation for *Enterococcus* inactivation through radiation reaching the water layer. Application to solar water disinfection (SODIS). *Sol. Energy*. 2017. V. 158. P. 303-310.
27. Van den Berghe E., De Winter T., De Vuyst L. Enterocin a production by *enterococcus faecium* FAIR-E 406 is characterised by a temperature- and pH-dependent switch-off mechanism when growth is limited due to nutrient depletion. *Int. J. Food Microbiol.* 2006. V.107 (2). P. 159-170.
28. Rozen Y., Belkin S. Survival of enteric bacteria in seawater. *FEMS Microbiol. Rev.* 2001. V. 25 (5). P. 513-529.
29. Lessard E.J., Sieburth J.M. Survival of natural sewage populations of enteric bacteria in diffusion and batch chambers in the marine environment. *Appl. Environ. Microbiol.* 1983. V. 45(3). P. 950-959.
30. Physiological response of *enterococcus faecalis* JH2-2 to cold shock: growth at low temperatures and freezing/thawing challenge. B. Thammavongs et al. *Lett. Appl. Microbiol.* 1996. V.23(6). P. 398-402.
31. Antimicrobial activity of printed composite TiO₂/SiO₂ and TiO₂/SiO₂/Au thin films under UVA-LED and natural solar radiation. I. Levchuk et al. *Appl. Catal. B Environ.* 2018. V. 239. P. 609-618.
32. Zenoff V.F., Siñeriz F., Farias M.E. Diverse responses to UV-B radiation and repair mechanisms of bacteria isolated

- from high-altitude aquatic environments. *Appl. Environ. Microbiol.* 2006. V.72(12). P. 7857-7863.
33. Wavelength dependence of biological damage induced by UV radiation on bacteria. A.L. Santos et al. *Arch. Microbiol.* 2013. V. 195(1). P. 63-74.
 34. Solar disinfection of drinking water (SODIS): an investigation of the effect of UV-A dose on inactivation efficiency. E. Ubomba-Jaswa et al. *Photochem. Photobiol. Sci.* 2009. V. 8 (5). P. 587-595.
 35. Capability of 19-L polycarbonate plastic water cooler containers for efficient solar water disinfection (SODIS): field case studies in India, Bahrain and Spain. M.B. Keogh et al. *Sol. Energy.* 2015. V. 116. P. 1-11.
 36. World Health Organization (WHO) Evaluating household water treatment options: health-based targets and microbiological performance specifications. 2011. Available at: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/44693>.

РОЗДІЛ 5

МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ СОНЯЧНОЇ ДЕЗИНФЕКЦІЇ ПИТНОЇ ВОДИ

Основні питання та шляхи їх вирішення у контексті методів реалізації сонячної дезінфекції питної води наступні.

5.1 Матеріал і форма контейнерів

Пластикові пляшки виготовляються або з ПЕТ (поліетилентерефталату), або з ПВХ (полівінілхлориду).

Як відрізнити ПЕТ від ПВХ?

ПВХ пляшки часто мають синюватий відблиск, який особливо помітний на краях вирізаного шматка пляшкового матеріалу. Якщо горить ПВХ, запах диму є різким, а запах ПЕТ – солодким. ПЕТ горить легше, ніж ПВХ.

Якому матеріалу пластикових пляшок надавати перевагу: ПЕТ чи ПВХ?

Різні типи прозорих пластикових матеріалів добре передають світло в УФ-А та видимому діапазоні сонячного спектру. Обидва матеріали містять добавки, такі як УФ-стабілізатор, щоб підвищити їхню стабільність або захистити їх та їхній вміст від окислення та УФ-випромінювання. Рекомендується використовувати пляшки з ПЕТ замість ПВХ, оскільки ПЕТ містить набагато менше добавок, ніж пляшки з ПВХ.

Пластикові пляшки чи скляні пляшки?

Пропускання УФ-випромінювання через скло визначається вмістом у ньому оксиду заліза. Звичайне віконне скло товщиною 2 мм майже не пропускає УФ-А світло. Тому його не можна використовувати для SODIS. Деякі спеціальні види скла (Pyrex, Correx, Vycor, Quartz) пропускають значно більше ультрафіолетового світла, ніж звичайне віконне скло.

ПЕТ пляшки.

Переваги ПЕТ: мала вага, прозорість, нейтральність на смак, хімічна стійкість.

Недоліки ПЕТ: обмежена термостійкість (деформація вище 65 °С), подряпини та інші ефекти старіння.

Скляні пляшки.

Переваги скла: відсутність подряпин, без фотопродукції, термостійкість.

Недоліки скла: легко розбиваються, більша вага, великі витрати.

5.2 Форма контейнерів

УФ-випромінювання зменшується зі збільшенням глибини води. При глибині води 10 см і помірній каламутності 26 NTU УФ-А випромінювання знижується на 50 % [1]. Тому контейнери, які використовуються для SODIS, не повинні перевищувати глибину води 10 см.

ПЕТ пляшки є дуже практичними та ідеальними контейнерами для SODIS тому, що глибина ПЕТ-пляшок не перевищує 10 см, коли вони знаходяться на сонці в горизонтальному положенні; ПЕТ-пляшки можна закривати, що знижує ризик повторного забруднення очищеної води; ПЕТ-пляшки легко доступні за низькою ціною, навіть у країнах, що розвиваються; ПЕТ-пляшки легко використовувати (напо-

внювати, переносити), що знижує ризик повторного забруднення; ПЕТ пляшки досить довговічні: навіть після кількох місяців застосування пляшка все ще залишається в хорошому стані.

Старіння пластикових пляшок.

Старіння пластикових пляшок призводить до зниження УФ-проникності, що, у свою чергу, може призвести до менш ефективної інактивації мікроорганізмів. Втрати пропускання можуть бути спричинені механічними подряпинами або фотопродуктами. Сильно подряпані старі пляшки слід замінити [2].

Фотопродукція.

Пластикові пляшки містять УФ-стабілізатори для підвищення їх стабільності та захисту матеріалу від окислення та ультрафіолетового випромінювання, оскільки сонячне світло не лише знищує патогенні мікроорганізми, але й перетворює пластик у фотопродукти. Ультрафіолетове світло призводить до фотохімічних реакцій, що призводить до зміни оптичних властивостей пластикового матеріалу. З часом добавки вичерпуються з основного матеріалу шляхом фотохімічної реакції або дифузії. Це впливає на властивості матеріалу: УФ-пропускання в спектральному діапазоні від 320 нм до 400 нм зменшується [2].

Лабораторні та польові випробування показали, що фотопродукти утворюються на зовнішній поверхні пляшок. Міграції фотопродуктів або добавок (УФ-стабілізаторів) у воду не спостерігалось [2].

5.3 Процедура виконання

Підготовка.

1. Перевірити, чи клімат і погодні умови підходять для SODIS.

2. Зібрати пластикові ПЕТ-пляшки об'ємом 1-2 л. Принаймні 2 пляшки із водою для кожного члена родини повинні бути виставлені на сонці, а інші 2 пляшки готові до вживання. Тому кожному члену сім'ї потрібно 4 пластикові пляшки для SODIS.

3. Перевірити водонепроникність пляшок, включаючи стан кришки, що закручується.

4. Вибрати відповідну основу для пляшок, наприклад лист гофрованого заліза.

5. Перевірити, чи достатньо прозора вода для SODIS (каламутність < 30 NTU). Воду з більшою каламутністю необхідно попередньо відфільтрувати.

6. Принаймні два члени сім'ї повинні пройти навчання програмі SODIS.

7. Відповідальність за виставлення пляшок SODIS на сонце повинна нести конкретна особа.

8. Замінити старі та подряпані пляшки.

Тестування SODIS за різних умов.

Багато технологій можуть здаватися дуже перспективними в лабораторних умовах, але виявляються невідповідними або демонструють набагато нижчу ефективність на рівні користувача. Саме тому SODIS пройшов ретельне тестування на мікробіологічну ефективність у широкому діапазоні польових умов.

Лабораторні дослідження проводилися в суворо контрольованих умовах, де були точно визначені найбільш відповідні параметри. Вибрані штами бактерій або вірусів піддавали в кварцових трубках штучному випромінюванню, що імітує сонячне світло, при цьому підтримувалися певні температури. Лабораторні дослідження дозволили кількісно визначити та зрозуміти вплив УФ-випромінювання та тепла на процес інактивації водних патогенів.

На другому етапі SODIS було протестовано в реальних умовах під час обширних польових досліджень, проведених установами-партнерами EAWAG у кількох країнах, що розвиваються.

Нарешті, ефективність SODIS як методу дезінфекції була представлена на демонстраційних семінарах та відстежувалась на рівні домогосподарств.

5.4 Ефективність SODIS у польових дослідженнях

З початку перших експериментів наприкінці сімдесятих років було проведено широкий спектр польових досліджень. Ефективність SODIS систематично перевірялася на різні збудники з використанням води різної якості, різних типів контейнерів і в різних кліматичних умовах.

Польові випробування дозволили визначити умови, за яких можна отримати високий рівень ефективності. Три найважливіші параметри застосування SODIS наступні:

- Використання прозорих пластикових пляшок об'ємом до 2 літрів.

- Експозиція дезінфекції впродовж 5-6 годин під сонячним світлом або злегка хмарним небом (наполовину закритими) з 9:00 до 15:00.

- Каламутність води не повинна перевищувати 30 NTU (нефелометричних одиниць каламутності).

Виконуючи ці вимоги, польові випробування підтвердили результати лабораторних досліджень, у яких досягнуто 3 log зменшення фекальних коліформ. Це означає, що в нормальних умовах SODIS показує ефективність близько 99,9%.

Результати польових досліджень, проведених у різних країнах, підкреслюють ефективність SODIS для різних параметрів.

Фізико-хімічна якість води.

Каламутність.

Сира вода, яка використовується для SODIS, має бути максимально чистою. Проте польові випробування показують, що каламутну воду до 30 NTU можна обробляти SODIS за нормальних кліматичних умов. Вода підвищеної каламутності потребує попередньої обробки [1, 3].

Кисень.

Лабораторні дослідження показали, що інактивація бактерій (*Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, *Streptococcus faecalis*, фекальні коліформи) набагато ефективніша в аеробних, ніж в анаеробних умовах. Польові випробування підтвердили, що струшування пляшок підвищує ефективність SODIS, але припускають, що ефект менший, ніж в лабораторних дослідженнях.

Рекомендується струшувати пляшки протягом приблизно 20 секунд перед тим, як наповнити їх повністю. Особливо це стосується відстояної води з низьким вмістом кисню, яку відбирають зі ставків, цистерн і колодязів [3- 5].

Кольоровість.

Випробування показали, що високий рівень кольоровості води збільшує час, необхідний для інактивації патогенів [3].

Мікробіологічна якість води.

Фекальні коліформи.

Більшість лабораторних і польових тестів було проведено з бактеріями *E. coli* або фекальними коліформами (група фекальних бактерій, що включає *E. coli*). За умов правильності виконання процедури дезінфекції рівень ефективності сягає 3 log (99,9%) [1, 4, 6].

Холерний вібріон.

Швидкість інактивації *V. cholerae* подібна до інактивації фекальних коліформ при температурі води > 50 °C. Якщо по-

рогова температура 50 °C не досягнута, *V. cholerae* показує вищу швидкість інактивації, ніж фекальні колиформні бактерії [1, 7].

Протозоа.

Лабораторні тести показують, що лямблії (*G. lamblia*, *G. muris*), дуже поширені протозоа, що передаються водою, чутливі до сонячного світла. Інший протозоа, *Cryptosporidium parvum*, є більш стійким. Проводяться польові випробування обох паразитарних агентів.

5.5 Аналіз ефективності SODIS на демонстраційних семінарах

Семінари пропонують гарну можливість перевірити ефективність SODIS у широкому діапазоні умов. Такі параметри, як вода, погода, час впливу, встановлюються місцевими умовами. Часто можна протестувати різні типи контейнерів і підставок для пляшок, щоб учасники самі могли оцінити найбільш прийнятні умови для SODIS і відповідним чином рекомендувати дану технологію. Підсумок всіх семінарів SODIS у Латинській Америці за три роки показав наступне: 81% проаналізованих зразків показали рівень дезінфекції на фекальні колиформи понад 99,9%; 9% - в діапазоні 99-99,9%; 4% - в діапазоні 90-99%; 5% - менше 90%.

5.5.1 Якість води на рівні користувача

Виміряти ефективність SODIS на рівні користувача не так просто, як під час демонстраційного семінару. Насправді швидкість інактивації бактерій не завжди можна точно визначити, оскільки дані про початкове зараження часто недоступні. Через операційні, матеріально-технічні та людські обмеження дослідження ефективності SODIS на

рівні користувача є складним. Поточні проекти розповсюдження SODIS зосереджені на соціальних та освітніх аспектах. Якість води, як правило, періодично перевіряється, переважно з дидактичною метою, щоб продемонструвати користувачам ефективність SODIS.

Зазвичай вода, оброблена SODIS, аналізується одночасно з сирою водою. Необроблена вода береться з того самого джерела води, що й вода SODIS. Таким чином, неможливо виміряти точну швидкість інактивації SODIS, але якість води SODIS порівнюється із загальною якістю питної води користувача, взятої безпосередньо з джерела. Найкращі дані, доступні на рівні користувача, є у проекті впровадження SODIS, реалізованого в двох сільських громадах регіону Матагальпа в Нікарагуа [8].

Обидві громади не мають системи водорозподілу та отримують воду з 5 різних джерел води (критий колодязь, відкрита свердловина, природне джерело тощо). Мікробіологічна якість джерел коливається від 0 до >2000 КУО/100 мл. Усі зразки із ємностей для зберігання показали фекальні забруднення внаслідок первинного забруднення джерела або вторинного забруднення під час транспортування та/або зберігання. Після фази інтенсивного підвищення обізнаності та навчання 66 домогосподарств прийняли SODIS як новий метод очищення питної води.

Під час наступних візитів до кожного домогосподарства попросили надати два зразки неочищеної води та води SODIS. У більшості випадків воду, оброблену SODIS, брали безпосередньо з пластикових пляшок, хоча деякі домогосподарства зберігали її в домашніх ємностях з потенційним ризиком вторинного забруднення. Обидва зразки очищеної та неочищеної води були перевірені на фекальні коліформи, що дозволило опосередковано розрахувати ефективність SODIS.

Ці дані об'єднують усі можливі джерела помилок або забруднення на рівні користувача: неоптимальне розташування пляшок, занадто короткий час експозиції, вторинне забруднення через погане зберігання тощо. Тому вони дають дуже гарне уявлення про те, чого можна досягти з точки зору покращення якості води на рівні користувача.

5.5.2 Пляшки та підставка для пляшок

Пластикові пляшки.

Польові випробування показали, що прозорі ПЕТ-пляшки об'ємом 2 літри є дуже підходящою тарою для SODIS. Випробування показують хороші результати як для зворотних, так і для нових одноразових пляшок, однак останні дещо кращі, оскільки вони пропускають більше ультрафіолетового випромінювання. Кольорові пляшки недостатньо пропускають УФ-випромінювання, тому їх не слід використовувати для SODIS.

Скляні пляшки.

Прозорі скляні пляшки теоретично також можуть бути використані як альтернатива пластиковим пляшкам. Однак скло з більшим вмістом оксиду заліза пропускає менше УФ-А випромінювання. Польові випробування підтверджують, що деякі скляні пляшки демонструють нижчі показники дезінфекції. Крім того, скляні пляшки часто розбиваються, тому вони не рекомендуються [1, 9, 10].

Сумка SODIS.

Спеціально розроблені сумки SODIS показують більш високу ефективність завдяки кращому співвідношенню поверхні та об'єму, але вони не рекомендуються внаслідок недоступності на місці, з ними важко поводитися, вони ламаються швидше, ніж пластикові пляшки [1].

Пластиковий пакет.

Місцеві доступні прозорі поліетиленові пластикові пакети були протестовані та показали дуже високу ефективність дезінфекції, але не рекомендуються з тих самих практичних міркувань [11].

Основа для пляшки.

Підвищення температури може бути отримано з використанням гофрованого заліза як основи для пляшок з водою. Інша темна основа також підходить [1, 4]

5.6 Приклад аналізу, проведеного на семінарі в Еквадорі

SODIS все ще залишається новою технологією для багатьох державних службовців і персоналу на місцях. Досить часто учасники семінарів із великим ентузіазмом сприймають ідею сонячної дезінфекції води, але все ще сумніваються щодо ефективності методу та вагаються щодо пиття води SODIS.

Найкращий підхід до переконання учасників в ефективності SODIS полягає в тому, щоб інтегрувати практичне навчання із застосування SODIS протягом першого дня семінару з подальшим мікробіологічним аналізом. Після виставлення пляшок на сонце зразки сирої води та води, обробленої SODIS, аналізуються на фекальні коліформи за допомогою портативного набору для тестування якості води. Зразки води фільтрують, а фільтри, що містять бактерії, потім інкубують протягом 16-18 годин при температурі 44°C. Наступного дня можна підрахувати колонії бактерій і оцінити ефективність SODIS.

Під час семінару, який відбувся в Кіто, Еквадор, у липні 2001 року, учасники були розділені на дві групи:

перша група використовувала неочищену водопровідну воду з громади Амагуана; група № 2 використовувала джерельну воду, змішану з забрудненою водою з річки Сан-Педро. Каламутність обох вод була нижче 5 NTU.

Пляшки виставляли на сонце з 8:30 ранку до 4 години вечора при повному сонячному світлі вранці, хмарах близько полудня та дощі вдень. Жодна з пляшок не досягла порогової температури 50°C, але УФ-випромінювання протягом дня було достатнім для повної дезінфекції 7 із 8 пляшок. Один флакон показав ефективність 99,6%. Під час попередніх експериментів ці пляшки продемонстрували нижчий коефіцієнт пропускання УФ-А і, відповідно, нижчу ефективність SODIS. У контрольній пляшці без експозиції суттєвого зниження не спостерігалось. Учасники семінару критично проаналізували результати тестування, представлені на чашках Петрі, і після цього переконалися в мікробіологічній ефективності. Таким чином, проведення таких тестів є дуже хорошим підходом до подолання сумнівів щодо ефективності методу.

5.7 Вплив погодних умов

Хмарне небо.

В умовах закритого неба можливо, що доза УФ, отримана протягом одного дня опромінення, буде недостатньою для досягнення задовільної якості води. Лабораторні тести, проведені з вірусами, показали, що доза опромінення є кумулятивною і що двох послідовних днів опромінення може бути достатньо для інактивації патогенів.

Ці дані ще потребують підтвердження в природних умовах та для інших патогенів.

Параметри, що впливають на температуру води.

Температура повітря і вітер є двома кліматичними факторами, що впливають на температуру води, яка безпосередньо впливає на ефективність процесу.

Проте польові випробування, проведені на північно-західному плато в Китаї та на високогір'ї Болівії, показали, що країни з холодним/помірним кліматом також підходять для SODIS за умов наявності достатньої сонячної радіації [4, 10].

5.8 Навчання користувачів програмі SODIS

Користувачі часто допускають помилки в застосуванні SODIS, що може значно знизити її ефективність. Наприклад, пляшки вранці виставляють на сонце, але через кілька годин місце залишається в тіні. Деякі користувачі ставлять пляшки вертикально або не знімають етикетку. Інтенсивне навчання та подальші візити є єдиним способом виправити неправильне поводження та підвищити ефективність дезінфекції на рівні користувача, як показано на наступних практичних прикладах.

Екологічний концерн (EC) у Кхонкен (Таїланд) вибрав два села, які використовують дощову воду як джерело води. Дощову воду збирають з даху будинків і зберігають у банках, що підвищує ймовірність вторинного забруднення води. Під час першої фази проекту SODIS міг лише збільшити відсоток незабруднених проб з 59% (проби сирі води без фекального забруднення) до 78% (проби води SODIS без фекального забруднення). Деякі зразки води SODIS навіть показали вищий рівень забруднення, ніж сира вода. Вторинне забруднення є найбільш вірогідною причиною цього досить несподіваного ре-

зультату. Жителям села рекомендовано не використовувати забруднену ємність для зберігання питної води при переливанні очищеної води. Протягом другого періоду тестування кількість незабруднених зразків для води SODIS зросла до 93%.

У сільській громаді Мелікан (Індонезія) 40% жителів сіл почали розміщувати свої контейнери на стільцях або бетонній підлозі, що, порівняно з гофрованим залізом, черепичним дахом або іншою темною поверхнею не є ідеальним місцем. Задня частина стільця часто затінювала пляшки через кілька годин. Лише 50% відкритих проб води були вільні від фекальних коліформ. Після того, як люди пройшли навчання та отримали відповідні гофровані листи, кількість неадекватних застосувань знизилася до 3%. В Індонезії порівняння між сільською та приміською громадою показало, що кількість неправильних заявок була значно нижчою серед більш освіченого населення приміської громади. Проте обидві громади змогли ще більше підвищити ефективність дезинфекції завдяки додатковому навчанню [12].

У Болівії під час демонстраційного проекту, проведеного в громаді Сакабамба, кілька зразків води SODIS містили високі концентрації фекальних коліформ. Швидше за все, причиною забруднення був дуже брудний гвинтовий кран пляшки [10].

У Китаї польові випробування із скляними пляшками об'ємом 2,5 л показали, що SODIS може збільшити кількість зразків, вільних від фекальних коліформ, з 25 % (сира вода) до лише 72 % (вода SODIS). Після заміни великих скляних пляшок на більш адекватні пластикові пляшки об'ємом 1,25 л 99,2% перевірених зразків SODIS показали відсутність фекальних коліформ.

5.9 Методи оптимізації біоцидної ефективності сонячної дезінфекції питної води

Ефективність сонячної дезінфекції (SODIS) залежить від ряду параметрів, включаючи тип патогенного мікроорганізму, інтенсивність опромінення, матеріал і розмір пляшок, місце і положення пляшки під час опромінення, каламутність і розчинену органічну речовину, вміст кисню, температуру води і повторне ріст збудників після опромінення. Кожен з них так чи інакше впливає на видалення збудника. Детальний розгляд кожного з цих факторів обговорюється в посібнику SODIS [13].

Цілком очевидно, що для мінімізації цих факторів і підвищення, таким чином, ефективності SODIS розроблено певні технологічні прийоми, які потребують відповідної гігієнічної характеристики.

Щоб усунути деякі обмеження традиційного методу SODIS, було вивчено деякі інноваційні стратегії, спрямовані на покращення процесу дезінфекції та максимізацію переваг SODIS. Вони включають такі підходи, як фарбування дна пластикових пляшок у чорний колір для посилення термічної дезінфекції [14], використання сонячних концентраторів/рефлекторів для посилення радіаційного опромінення та включення хімічних добавок, таких як лимонна кислота або рибофлавін, які можуть активуватися сонячним світлом [15, 16]. Відомо, що такі хімічні добавки, як сполуки на основі цитрусових [17] і рибофлавін [18], покращують сонячну дезінфекцію. Наприклад, у дослідженні Harding & Schwab [19] сік/м'якоть лайма знизили рівень *E. coli* протягом короткого періоду часу – 30 хвилин. Heaselgrave & Kilvington [18] використовували рибофлавін (вітамін B2), який у поєднанні з УФ-А випромінюванням є потенційним засобом лікування

очних бактеріальних і грибкових патогенів. Результати демонструють, що включення рибофлавіну в SODIS (SODIS-R) значно покращило знищення мікроорганізмів порівняно з SODIS окремо. Додавання рибофлавіну скоротило час, необхідний для повної інактивації, що дозволило SODIS-R досягти швидшого та ефективнішого усунення мікроорганізмів, ніж SODIS окремо. Однак на високостійкі цисти *A. polyphaga* та спори *Bacillus subtilis* SODIS та SODIS-R не впливали при опроміненні 150 Вт/м².

Крім того, дослідження Rodríguez-Chueca et al. [7] показує доцільність посилення сонячної дезінфекції (SODIS) шляхом включення хімічних добавок, таких як пероксимоносульфат (PMS) і пероксидисульфат (PDS), для генерації сульфатних і гідроксильних радикалів різними шляхами активації. Дослідження вивчало ефективність використання різних промоторів, включаючи опромінення сонячним світлом, помірне тепло (40 °C) і мікромолярні кількості Fe²⁺ як факторів активації. Результати показали, що PMS має вищу ефективність у порівнянні з PDS у видаленні *E. coli* при нижчих концентраціях і коротшому часі реакції для повної інактивації бактерій. Коли всі промотори були об'єднані (окислювач/Fe²⁺/сонячне світло/40 °C), повна інактивація бактерій була досягнута протягом 30 хвилин за допомогою PMS, тоді як це зайняло вдвічі більше часу з PDS. Крім того, додавання гідроксильних радикалів разом із PMS ще більше покращує процес дезінфекції, досягаючи повного видалення бактерій лише за 20 хвилин. Крім того, комбіновані процеси були ефективними для усунення забруднюючих речовин, що викликають занепокоєння, таких як ліки та пестициди. Також були зроблені зусилля для концентрації сонячного випромінювання всередині пляшок SODIS за допомогою сонячних дзеркал. Наприклад, ефективність інактивації *E. coli* була значно покращена в пляшках, по-

критих алюмінієвою фольгою, у дослідженні Kehoe et al. [20]. Бактеріальні популяції у пляшках із фольгою показали середню константу інактивації у 1,85 раза вищу, ніж ті, що не мали фольги, що вказує на більш швидку інактивацію. За даними McGuigan et al. [15], було досліджено декілька конструкцій проточних реакторів для покращення сонячної дезінфекції. Деякі конструкції зосереджені на збільшенні оптичної інактивації за рахунок використання сонячних колекторів і відбивачів, тоді як інші спрямовані на посилення термічної інактивації шляхом включення чорних пластин або фотокаталізатора TiO_2 .

Інтеграція SODIS з більш просунутими підходами, такими як гетерогенний фотокаталіз і сонячні фототермічні системи дезінфекції, є перспективною для усунення обмежень традиційних методів SODIS. Вважається, що ці методи є більш ефективними, і повідомляється, що їх інтеграція з SODIS дає кращі результати. Наприклад, згідно з Cowie et al. [16] вискоефективний фотокаталізатор здатний покращити SODIS набагато більшою мірою порівняно з іншими підходами до покращення. Однак їх вартість є надзвичайно високою, щоб розглядати їх як частину системи SODIS для використання в країнах, що розвиваються, де головною проблемою широких верств населення є бідність [15]. Інші доступні методи підвищення ефективності стандартної процедури включають розміщення наповнених пластикових пляшок на поверхнях, що відбивають сонячне світло, таких як алюмінієві або гофровані листи, щоб збільшити кількість сонячного світла, що поглинається пляшкою, інтенсивне струшування пляшки, заповненої на дві третини, протягом 30 сек перед доповненням і герметизацією, щоб підвищити початкові рівні розчиненого кисню для процесів окисної інактивації, спричинених сонцем, і фільтрації води перед заповненням [15].

5.9.1 Фотокаталіз діоксиду титану

Фотокаталіз став багатообіцяючим методом очищення води, мінімізуючи обмеження традиційних підходів дезінфекції SODIS. Це передбачає використання енергії світла для полегшення хімічної реакції між фотокаталізатором і забрудненою водою. Зазвичай як фотокаталізатор використовується напівпровідниковий матеріал, наприклад діоксид титану (TiO_2). Під впливом світла TiO_2 генерує активні форми кисню (АФК), які можуть інактивувати мікроорганізми. Цей фотокаталітичний процес продемонстрував надзвичайну ефективність, стабільність, доступність і безпеку. TiO_2 є широко вивченим фотокаталізатором для обробки води, зокрема для інактивації патогенів [21-24]. Коли TiO_2 піддається впливу світлової енергії, він генерує негативні (e^-) і позитивні (h^+) пари. Вони беруть участь в окисно-відновних реакціях, що призводить до виробництва АФК [25]. Ці АФК мають потужний окислювальний потенціал, що дозволяє їм проникати через клітинні стінки мікроорганізмів і порушувати їх клітинні структури [15, 26]. Атака на клітинну мембрану вивільняє внутрішньоклітинні органічні речовини, які потім окислюються АФК, викликаючи подальше пошкодження життєво важливих компонентів і процесів мікроорганізму [25]. Це в кінцевому підсумку призводить до інактивації мікроорганізму. Фотокаталітичний механізм TiO_2 за участю АФК був ретельно вивчений [27-29] і базується на унікальних електронних характеристиках TiO_2 як напівпровідника [28]. При достатній енергії фотонів ($h\nu$) утворюються пари e^- і h^+ , ініціюючи серію відновних і окисних реакцій на поверхні TiO_2 . Міжфазові окисно-відновні реакції між (e^-) і (h^+) служать основними реакціями, що лежать в основі

фотокаталітичного процесу [23]. На рис. 5.1 показано утворення $(e^-)(h^+)$ пар, коли частинки TiO_2 опромінюються достатньою енергією фотонів.

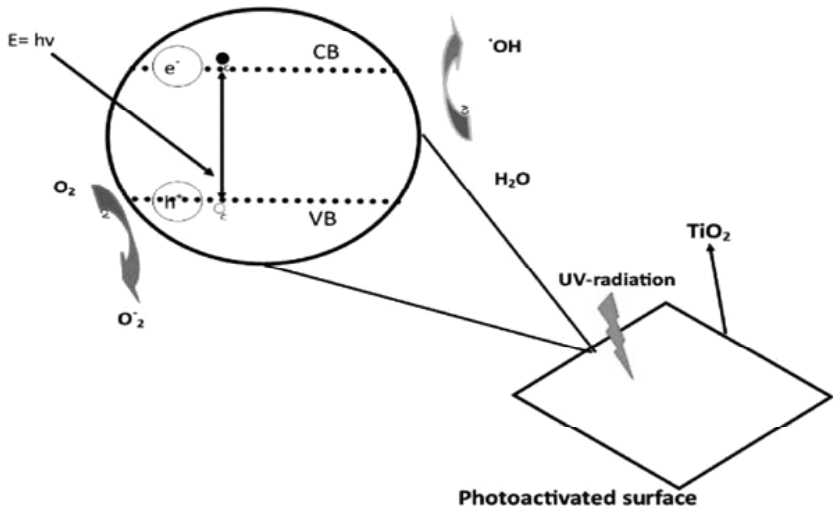


Рис. 5.1 Ілюстрація того, як $(e^-)(h^+)$ пари утворюються в частинці напівпровідника TiO_2 , коли вона піддається впливу світла в присутності забруднювача води.

Дослідження показали, що введення TiO_2 в SODIS значно підвищує його ефективність порівняно з традиційним SODIS. Duffy et al. [30] продемонстрували, що використання гнучких пластикових вставок, покритих порошком TiO_2 , у реакторах SODIS із ПЕТ пластику призвело до покращення ефективності на 25% у порівнянні зі стандартними реакторами SODIS щодо інактивації *E. coli* K12. В іншому дослідженні обладнані TiO_2 реактори SODIS досягли швидшої інактивації мікроорганізмів порівняно зі стандартним SODIS, навіть під час часткової хмарності [31]. Наявність TiO_2 в обробці SODIS призвела до швидшої та ефективнішої дезінфекції, досягаючи невиявлених рівнів коліформних бактерій за ко-

ротший час впливу. У дослідженні, проведеному Gelover et al. [32], було встановлено, що для ефективної дезінфекції необхідна мінімальна середня глобальна радіація 800 Вт/м², а фотокаталіз TiO₂ запобігає повторному росту бактерій, що спостерігається при стандартній обробці SODIS. Фотокаталітичні властивості TiO₂ сприяли незворотному пошкодженню бактеріальних клітин, навіть стійких до УФ-променів мікроорганізмів, запобігаючи повторному росту після дезінфекції.

5.9.2 Сонячна фототермічна дезінфекція з використанням наноматеріалів

Сонячні фототермічні системи дезінфекції використовують сонячну енергію для генерації тепла, що має вирішальне значення для знищення патогенів. Плазмонні наночастинки на основі благородних металів, такі як золото, срібло та платина, широко вивчалися на предмет їх фототермічних властивостей. Однак їх практичне використання обмежене через високу вартість і потенційну токсичність [33]. Щоб подолати ці проблеми, дослідники зосередилися на розробці альтернативних і економічно ефективних фототермічних каталізаторів з використанням наночастинок на основі вуглецю та фосфору, отриманих із доступних ресурсів. Включення матеріалів, що збирають світло, таких як вуглецеві нанотрубки (ВНТ) або металеві наночастинки, у фототермічні системи дезінфекції покращує поглинання тепла та температуру води, що призводить до інактивації патогенів [34]. Сонячна фототермічна дезінфекція поєднує теплові ефекти з іншими механізмами знищення патогенів шляхом порушення клітинних процесів, пошкодження клітинних структур, денатурації білків і руйнування клітинних мембран. Дослідження показали, що сонячне випромінювання підвищує температуру води, при-

скорюючи інактивацію бактерій. Удосконалені системи SODIS з фототермічними перетворювальними матеріалами досягають ще вищих температур. Синергія між сонячним випромінюванням і фотоіндукованим теплом призводить до накопичення АФК, що ще більше посилює інактивацію бактерій [35].

Недавнє дослідження Hong та ін. [35] досліджували використання фототермічного плівкового реактора з ВНТ, який ефективно передавав тепло воді та швидко нагрівав її до температури вище 45 °С, що призводило до значної інактивації бактерій протягом лише 20 хвилин. Накопичені АФК зіграли вирішальну роль у руйнуванні бактеріальних клітинних мембран і РНК, що зрештою призвело до загибелі бактеріальних клітин. Транскриптомний аналіз виявив зміни в експресії генів під час сонячної фототермічної дезінфекції, причому специфічні гени демонструють підвищену активність під впливом тепла та фототермічного стресу. Наприклад, ген *SafA* відіграє певну роль в інгібуванні накопичення ROS та окисного стресу. Сонячна фототермічна дезінфекція також вплинула на метаболічні шляхи, шляхи, пов'язані з рибосомами, і синтез нуклеїнових кислот, сприяючи інактивації бактерій.

Досліджено наноматеріали, здатні перетворювати сонячну енергію на тепло для прямої інактивації бактерій і вірусів [34]. Щоб полегшити практичну реалізацію, автори розробили метод іммобілізації цих світлопоглинаючих наноматеріалів на плівках, створюючи функціональні пристрої для очищення води. Завдяки своїм експериментам вони продемонстрували, що ці спеціально розроблені плівки під впливом імітованого сонячного світла володіють здатністю термічно деактивувати бактерії та віруси. Ефективність підходу була підтверджена шляхом успішної інактивації сурогатних мікроорганізмів, включаючи *E. coli*

К-12 та бактеріофаги MS2 і PR772. У наступному дослідженні [36] повідомлено, що використання світлозбираючих наночастинок у формі фототермічних плівок дозволяє досягти функціональних температур дезінфекції за допомогою неконцентрованого сонячного світла. Плівки, що містять наночастинки, інактивували патогени навіть при більшій швидкості потоку. Моделювання показало, що компактний реактор (45 см × 45 см) може виробляти 8 л безпечної води на день при 8 годинах впливу сонячного світла, що підкреслює можливість масштабування для потреб громади.

Література

1. SODIS – An Emerging Water Treatment Process. B. Sommer et al. J. Water SRT – Aqua. 1997. V. 46. P. 127-137.
2. Does sunlight change the material and content of polyethylene terephthalate (PET) bottles? M. Wegelin et al. J. Water SRT – Aqua. 2000. V. 50(3). P. 125-135.
3. Reed R.H. Innovations in solar water treatment. 22nd WEDC Conference, Durban, South Africa. 1997. P. 184-185.
4. Quispe V., Mercado A., Iriarte M. Ensayos sobre desinfección solar. Reporte de Investigación, CASA, UMSS, Cochabamba, Bolivia. 2000.
5. Reed R.H. Solar inactivation of faecal bacteria in water: the critical role of oxygen. Letters in Applied Microbiology. 1997. V. 24. P. 1-5.
6. Solar Water Disinfection: Scope of the Process and Analysis of Radiation Experiments. M. Wegelin et al. J. Water SRT – Aqua. 1994. V. 43(4). P. 154-169/
7. Uso de la radiación solar en la inactivación del *Vibrio cholerae* en agua para consumo humano. Factores que condicionan la eficiencia del proceso. Y. Solarte et al. Colombia Medica. 1997. V. 28. N. 3.

8. Kefauver J. Solar Water Disinfection Project, Mataagalpa, Nicaragua. Project Report. 2000.
9. Solar Water Disinfection. T.A. Lawand et al. Proceedings of a Workshop held at the Brace Research Institute, Montreal, Que., Canada, 15 - 17 August 1988.
10. CASA/ UMSS. Desinfeccion Solar de Aguas (SODIS). Informe final. Final Report. 1997.
11. Rocha J.C. Desinfeccion Solar del Agua. Tesis. UMSA, La Paz. 1985.
12. Wegelin M., Sommer B. Solar Water Disinfection (SODIS) destined for worldwide use? *Waterlines*. 1998. V.16. N 3. P. 30-32.
13. Luzi S., Tobler M., Suter F., Meierhofer R. SODIS Manual: Guidance on Solar Water Disinfection. SANDEC, Department of Sanitation, Water and Solid Waste for Development, Eawag, Switzerland. 2016. Available from: https://www.sodis.ch/methode/anwendung/ausbildungsmaterial/dokumente_material/sodismanual_2016_lr.pdfM.
14. Wegelin M., Sommer B. Solar water disinfection (SODIS) - destined for worldwide use? *Waterlines*. 1998. V. 16(3). P. 30-32. <https://doi.org/10.3362/0262-8104.1998.013>.
15. Solar water disinfection (SODIS): a review from bench-top to roof-top. K. G. McGuigan et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2012. V. 235. P. 29-46. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.053>.
16. Cowie B. E., Porley V., Robertson N. Solar disinfection (SODIS) provides a much underexploited opportunity for researchers in photocatalytic water treatment (PWT). *ACS Catalysis*. 2020. V. 10 (20). P. 11779-11782. <https://doi.org/10.1021/acscatal.0c03325>.
17. Harding A. S., Schwab K. J. Using limes and synthetic psoralens to enhance solar disinfection of water (SODIS): a laboratory evaluation with norovirus, *Escherichia coli*, and MS2.

The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene. 2012. V. 86 (4). 566. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.2012.11-0370>.

18. Heaselgrave W., Kilvington S. Antimicrobial activity of simulated solar disinfection against bacterial, fungal, and protozoan pathogens and its enhancement by riboflavin. *Applied and Environmental Microbiology*. 2010. V. 76 (17). P. 6010-6012
19. Solar-assisted bacterial disinfection and removal of contaminants of emerging concern by Fe²⁺-activated HSO₅⁻-Vs. S₂O₈²⁻-in drinking water. J. Rodriguez-Chueca et al. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2019. V. 248. P. 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.02.018>.
20. Effect of agitation, turbidity, aluminium foil reflectors and container volume on the inactivation efficiency of batch-process solar disinfectors. S. Kehoe et al. *Water Research*. 2001. V. 35 (4). P. 1061-1065. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00353-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00353-5).
21. Butterfield I., Christensen P., Curtis T., Gunlazuardi J. Water disinfection using an immobilised titanium dioxide film in a photochemical reactor with electric field enhancement. *Water Research*. 1997. V. 31 (3). P. 675-677. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00391-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00391-0).
22. Caballero L., Whitehead K., Allen N., Verran J. Inactivation of *Escherichia coli* on immobilized TiO₂ using fluorescent light. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2009. V. 202 (2-3). P. 92-98. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2008.11.005>.
23. Bono N., Ponti F., Punta C., Candiani G. Effect of UV irradiation and TiO₂-photocatalysis on airborne bacteria and viruses: an overview. *Materials*. 2021. V. 14 (5). 1075. <https://doi.org/10.3390/ma14051075>.

24. Guo Q., Zhou C., Ma Z., Yang X. Fundamentals of TiO₂ photocatalysis: concepts, mechanisms, and challenges. *Advanced Materials*. 2019. V. 31 (50). 1901997. <https://doi.org/10.1002/adma.201901997>.
25. Probing the intracellular organic matters released from the photocatalytic inactivation of bacteria using fractionation procedure and excitation-emission-matrix fluorescence. G. Huang et al. *Water Research*. 2017. V. 110. P. 270-280. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.032>.
26. Foster H. A., Ditta I. B., Varghese S., Steele A. Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2011. V. 90. P. 1847-1868. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3213-7>.
27. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends. S. Malato et al. *Catalysis Today*. 2009. V. 147 (1). P. 1-59. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.06.018>.
28. Chong M. N., Jin B., Chow C. W., Saint C. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. *Water Research*. 2010. V. 44 (10). P. 2997-3027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039>.
29. Understanding TiO₂ photocatalysis: mechanisms and materials. J. Schneider et al. *Chemical Reviews*. 2014. V. 114 (19). P. 9919-9986. <https://doi.org/10.1021/cr5001892>.
30. A novel TiO₂-assisted solar photocatalytic batch-process disinfection reactor for the treatment of biological and chemical contaminants in domestic drinking water in developing countries. E. Duffy et al. *Solar Energy*. 2004. V. 77 (5). P. 649-655. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.05.006>.
31. Solar and photocatalytic disinfection of protozoan, fungal and bacterial microbes in drinking water. J. Lonnen et al.

- Water Research. 2005. V. 39 (5). P. 877-883. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.11.023>.
32. Gelover S., Gomez L. A., Reyes K., Leal M. T. A practical demonstration of water disinfection using TiO₂ films and sunlight. *Water Research*. 2006. V. 40 (17). P. 3274-3280. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.006>.
 33. Nanomaterial-enabled photothermalbased solar water disinfection processes: fundamentals, recent advances, and mechanisms. Z. Tang et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. 129373. <https://doi.org/10.1016/pj hazmat.2022.129373>.
 34. Loeb S., Li C., Kim J.-H. Solar photothermal disinfection using broadband-light absorbing gold nanoparticles and carbon black. *Environmental Science & Technology*. 2018. V. 52 (1). P. 205-213. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04442>.
 35. Mechanisms of Escherichia coli inactivation during solar-driven photothermal disinfection. Y. Hong et al. *Environmental Science: Nano*. 2022. V. 9 (3). P. 1000-1010. <https://doi.org/10.1039/d1en00999k>.
 36. Nanoparticle enhanced interfacial solar photothermal water disinfection demonstrated in 3-D printed flow-through reactors. S. K. Loeb et al. *Environmental Science & Technology*. 2019. V. 53 (13). P. 7621-7631. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01142>.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз основних принципів сонячної дезінфекції свідчить про потужні перспективи впровадження цього методу забезпечення епідемічної безпечності питної води в невеликих сільських громадах або при надзвичайних ситуаціях (природні, техногенні та соціальні лиха) [1-3].

2. Гігієнічна оцінка біоцидної ефективності сонячної дезінфекції дозволяє заключити наступне [4]:

- Синергетичний біоцидний ефект SODIS, як наслідок спільного впливу ультрафіолетового світла та підвищення температури води, забезпечує інактивацію 99,9% багатьох кишкових мікроорганізмів.

- Аналіз контрольованих досліджень показав зниження частоти діарейних захворювань за допомогою SODIS у діапазоні від 36 до 75,8 %.

- Певні патогени, наприклад цисти, можуть бути менш сприйнятливими до сонячної дезінфекції, вимагаючи альтернативних підходів або вищих доз УФ-опромінення для ефективної інактивації.

- Слід вирішити питання подовження часу впливу, повторного росту патогену, резистентності під час застосування SODIS, використання недорогих і стійких матеріалів. Це може включати дослідження альтернативних матеріалів або модифікацію існуючих для підвищення доступності цієї технології [4].

3. Аналіз окремих аспектів вивчення сонячної дезінфекції свідчить, що цей метод широко вивчався і продовжує вивчатися у багатьох країнах і є предметом пильної уваги дослідників різних сфер знань.

4. Основою реалізації сонячної дезінфекції питної води є необхідність ретельного дотримання певних методичних процедур як підґрунтя ефективної інактивації мікроорганізмів та епідемічної безпечності питної води [5].

5. Аналіз кількох інноваційних підходів для підвищення ефективності SODIS, зокрема фотокаталізу TiO_2 і сонячної фототермічної дезінфекції за допомогою наноматеріалів, показав багатообіцяючі результати щодо покращення ефективності інактивації та запобігання повторному росту патогенів. Це свідчить про необхідність розробки недорогих і стійких матеріалів як більш доступних для спільнот з обмеженими ресурсами [6].

6. Аналіз досліджень водно-балансового моделювання водного стоку, представлений у роботах [7-9], показав, що з 2041 року можливе припинення місцевого поверхневого стоку в маловодні роки в Херсонській, Одеській, Миколаївській, Дніпропетровській та Запорізькій областях. У 2041–2060 рр. — період середньої водності — це явище охоплюватиме території Херсонської, Одеської, Миколаївської та Запорізької областей, а в 2061–2080 рр. до цього регіону приєднуються Дніпропетровська, Запорізька, Кіровоградська області та АР Крим [10]. Це може викликати колапс систем централізованого водопостачання із поверхневих джерел. Ситуація неминуче ускладниться у зв'язку із наслідками руйнації водоочисної інфраструктури під час війни та економічною кризою. Тому, перспективність впровадження технології SODIS для знезараження питної води у сільських населених пунктах півдня України є безсумнівною.

7. Результати порівняльних досліджень ефективності сонячної дезінфекції у помірному та субтропічному кліматі

[11] обґрунтовують можливість використання цього методу на півдні України із квітня по жовтень, що суттєво розширює масштаби його впровадження.

Література

1. Мокієнко А.В., Лотоцька О.В. Сонячна дезінфекція води: сучасний стан та перспективи впровадження. Актуальні проблеми транспортної медицини. 2024. №1. С. 50-61.
2. Бабієнко В.В., Мокієнко А.В., Валькевич Д.В. Ефективність сонячної системи знезараження вод для сільських населених пунктів. Матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю «Екологічні та гігієнічні проблеми сфери життєдіяльності людини» (Київ, 13 березня 2024 р.). За загальною редакцією член-кор. НАМН України, професора С.Т. Омельчука. К.: МВЦ «Медінформ», 2024. С. 41-42.
3. Мокієнко А.В., Лотоцька О.В. Сонячна дезінфекція як перспективний засіб інактивації мікробних патогенів у питній воді сільських населених пунктів. Ресурси природних вод Карпатського регіону / Проблеми охорони та Рационального використання. Матеріали Двадцять другої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів, 23–24 травня, 2024 р.): збірник наукових статей – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2024. С. 205-207.
4. Мокієнко А. В., Лотоцька О. В. Гігієнічна оцінка біоцидної дії сонячної дезінфекції. Вісник морської медицини. 2024. №1. С. 176-183.
5. Мокієнко А. В., Гринзовський А.М. Методичні основи сонячної дезінфекції питної води. Актуальні проблеми транспортної медицини. 2024. №2. С. 27-34.

6. Мокієнко А.В., Гринзовський А.М. Гігієнічна оцінка методів оптимізації біоцидної ефективності сонячної дезінфекції питної води. Вісник морської медицини. 2024. №2. С. 186-192.
7. Мокієнко А.В., Бабієнко В.В., Гущук І.В. Клімат, вода та інфекції: нові виклики для півдня України на тлі старих проблем. Public Health Journal. 2023. Вип. 4. С. 41-49.
8. Мокієнко А.В., Бабієнко В.В., Гущук І.В. Клімат півдня України: прогностична оцінка впливу на водозабезпечення населення регіону Матеріали XXIII Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство», 7 грудня 2023 р., м. Київ. С. 232-236.
9. Бабієнко В.В., Мокієнко А.В., Валькевич Д.В. Кліматичні загрози водопостачанню півдня України. Томілінські читання: VI науково-практична конференція з міжнародною участю «Громадське здоров'я в Україні: проблеми та способи їх вирішення». Присвячується 100-річному ювілею кафедри громадського здоров'я та управління охороною здоров'я Харківського національного медичного університету. С. 142-144.
10. Сніжко С., Шевченко О., Дідовець Ю. Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України (повний звіт за результатами проекту). Центр екологічних ініціатив «Екодія». 2021. 68 с.
11. Solar disinfection – An appropriate water treatment method to inactivate faecal bacteria in cold climates. A. Juvakoski et al. Science of The Total Environment. 2022. V. 827. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154086>

Навчальне видання

БАБІЄНКО Володимир Володимирович,

МОКІЄНКО Андрій Вікторович

ШАНИГІН Антон Вікторович

ВАЛЬКЕВИЧ Денис Вячеславович

ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ СОНЯЧНОЇ ДЕЗІНФЕКЦІЇ ПИТНОЇ ВОДИ

Учбовий посібник

Головний редактор

Й. О. Бурчо

Комп'ютерна верстка

О. В. Замойська

Формат 60 x 84 1/16. Ум. друк. арк. 6,98

Наклад 500 прим. Зам.

Оригінал-макет виготовлено

в редакційно-видавничій фірмі «Прес-кур'єр».

Свідоцтво про внесення видавця до Державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції серія ДК № 3764
від 22.04.2010 р.

(65076, м. Одеса, пл. Б. Дерев'янка, 1, оф. 717,

тел./факс (0482) 64-96-58, e-mail: pk.gazeta.odessa@gmail.com

Віддруковано з готового оригінал-макета.

Видавництво і друкарня «Астропринт»

65091, м.Одеса, вул. Разумовська, 21. Тел. 7-855-855.

www.astroprint.ua e-mail: astro_print@ukr.net

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №1373 від 28.05.2003 р.