

УДК 628.162: 613.34.: 502.65+546.134

DOI <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10888573>

СОНЯЧНА ДЕЗИНФЕКЦІЯ ВОДИ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ

Мокиєнко А.В., ¹Лотоцька О.В.

Національний університет «Острозька академія»

*¹Тернопільський національний медичний університет
імені І.Я. Горбачевського*

СОЛНЕЧНАЯ ДЕЗИНФЕКЦИЯ ВОДЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ

Мокиенко А.В., ¹Лотоцкая О.В.

Национальный университет «Острожская академия»

*¹Тернопольский национальный медицинский университет
имени И.Я. Горбачевского*

SOLAR DISINFECTION OF WATER: CURRENT STATE AND PROSPECTS OF IMPLEMENTATION

Mokienko A.V., ¹Lototska O.V.

Ostroh Academy National University

*¹Ternopil National Medical University
named after I.Ya. Gorbachevskii*

Summary/Резюме

Introduction. Domestic water treatment (HWT) methods have become practical and cost-effective solutions. They are specifically aimed at improving the microbiological quality of drinking water at the point of use, thereby providing immediate relief in areas lacking centralized water treatment infrastructure. Household water treatment and storage provides a temporary intervention for communities in the context of improving the microbiological quality of water at home.

The goal of the work. General characteristics of solar water disinfection.

Materials and methods. Bibliometric, analytical.

Research results and their discussion. An analysis of literature data was conducted to evaluate the effectiveness of SODIS in inactivating intestinal pathogens, improving microbial water quality, and reducing the incidence of diarrheal diseases. SODIS has been shown to reduce the incidence of diarrheal diseases by more than 75 % in some developing countries. The need for comprehensive studies to evaluate the performance and limitations of the integrated system under different environmental conditions and water sources is substantiated. This concerns the creation of practical recommendations for users to ensure optimal performance and reliable disinfection results; cooperation between researchers, engineers and politicians; exchange of knowledge and development of standardized protocols for the implementation of an integrated approach; raising public awareness and providing education about an integrated approach.

Keywords: *drinking water, household water purification methods, solar disinfection.*

Введение. Методы очищения бытовой воды (HWT) стали практическими и экономически эффективными решениями. Они специально нацелены на улучшение микробиологического качества питьевой воды в месте использования, обеспечивая тем самым немедленное облегчение в районах, где отсутствует централизованная инфраструктура очистки воды. Обработка и хранение воды для домохозяйств обеспечивает временные меры для общин в контексте улучшения микробиологического качества воды на дому.

Цель работы. Общая черта солнечной дезинфекции воды.

Материалы и методы. Библиометрические, аналитические.

Результаты исследований и их обсуждение. Проведен анализ данных литературы по оценке эффективности SODIS по инаktivации кишечных патогенов, улучшению микробного качества воды и снижению заболеваемости диарейными заболеваниями. Показано, что SODIS удалось снизить заболеваемость диарейными заболеваниями более чем на 75% в некоторых развивающихся странах. Обоснована необходимость комплексных исследований для оценки производительности и ограничений интегрированной системы в различных условиях окружающей среды и источников воды. Это касается создания практических рекомендаций для пользователей для обеспечения оптимальной работы и надежных результатов дезинфекции; сотрудничество между исследователями, инженерами и политиками; обмен знаниями и разработки стандартизированных протоколов для реализации комплексного подхода; повышение осведомленности общественности и обеспечение образования по интегрированному подходу.

Ключевые слова: питьевая вода, методы очистки бытовой воды, солнечная дезинфекция.

Вступ. Методи очищення побутової води (HWT) стали практичними та економічно ефективними рішеннями. Вони спеціально націлені на покращення мікробіологічної якості питної води в місці використання, тим самим забезпечуючи негайне полегшення в районах, де відсутня централізована інфраструктура очищення води. Обробка та зберігання води для домогосподарств забезпечує тимчасові заходи для громад у контексті покращення мікробіологічної якості води вдома.

Мета роботи. Загальна характеристика сонячної дезінфекції води.

Матеріали і методи. Бібліометричні, аналітичні.

Результати досліджень та їх обговорення. Проведено аналіз даних літератури щодо оцінки ефективності SODIS щодо інаktivації кишкових патогенів, покращення мікробної якості води та зниження захворюваності на діарейні захворювання. Показано, що SODIS вдалося знизити захворюваність на діарейні захворювання на понад 75 % у деяких країнах, що розвиваються. Обґрунтовано необхідність комплексних досліджень для оцінки продуктивності та обмежень інтегрованої системи за різних умов навколишнього середовища та джерел води. Це стосується створення практичних рекомендацій для користувачів для забезпечення оптимальної роботи та надійних результатів дезінфекції; співпраці між дослідниками, інженерами та політиками; обміну знаннями та розробки стандартизованих протоколів для реалізації комплексного підходу; підвищення обізнаності громадськості та забезпечення освіти щодо інтегрованого підходу.

Ключові слова: питна вода, методи очищення побутової води, сонячна дезінфекція.

Вступ

Як відомо, джерела забруднення питної води є всюдисущими. 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 споживан-

ня 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].

Мета роботи.

Загальна характеристика сонячної дезінфекції води.

Матеріали і методи

Бібліометричні, аналітичні.

Результати досліджень та їх обговорення

Сонячна дезінфекція води (SODIS) є одним із методів HWT, 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 сонячного 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 HWT 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 впроваджен-

ня 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 HWT.

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 розвивається (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].

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].

Обмеження SODIS

Тривалий час впливу

Одним із основних обмежень традиційного методу SODIS є тривалий час впливу, необхідний для досягнення ефек-

тивної 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.

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/м² і 20 °C відповідно. Кількість сонячного опромінення може значно коливатися 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].

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 застосування інших простих

способів зменшення каламутності води перед сонячною обробкою. Хоча, дослідження, проведені McGuigan et al. [21] та Joyce 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 °C.

Повторний ріст збудника

Мікроорганізми, в тому числі патогенні, розвинули механізми відновлення пошкоджень ДНК, спричинених теплом та іншими стресовими факторами. Це дозволяє їм відновити свою заразність і вижити в несприятливих умовах. Одним із важливих механізмів відновлення в різних організмах є фотореактивація, яка включає фермент фотоліазу. 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. Ексцизійна 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.

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 спороутворюючі 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] виявлено, 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. Причина цього полягає в специфічній структурі вірусу, що вимагає вищих температур ($> 56^{\circ}\text{C}$) і довжин хвиль УФ-С (100–280 нм) для успішної інактивації. Навпаки, звичайні системи SODIS зазвичай працюють при нижчих температурах ($< 45^{\circ}\text{C}$) 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.

Можливості та проблеми для постійного використання та масштабованості SODIS

Таким чином, ефективність методу SODIS у зниженні впливу кишкових пато-

генів 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 дрібномасштабні пілотні проекти, які охопили невелику кількість бенефіціарів, перетворюються на широке впровадження, яке в кінцевому підсумку досягає мільйонів [20].

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 витра-

тами [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].

Зручність для користувача

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

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 ви-

падку 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.

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.

Виклики

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 переконливих переваг, які б переконали користувачів продовжувати нову поведінку. Наприклад, є труднощі в переконанні лю-

дей, 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 адвокації відіграють життєво важливу роль у створенні SODIS на низовому рівні.

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 інактивацію 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 PET TJC) і контрольної (2 л PET пляшки) [31]. В іншому дослідженні Polo-Lopez et al. [32] спостерігали подібну кінетику інактивації *E. coli*, фага MS2 та *S. 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 оброб-

ки, 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.

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

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 їй 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.

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. Складні 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 та перспективи

Ефективність SODIS щодо інактивації кишкових патогенів, покращення мікробної якості води та зниження захворюваності на діарейні захворювання продемонстрована різними лабораторними роботами та польовими випробу-

ваннями. 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 життєво важливою для збору даних, обміну знаннями та розробки стандартизованих протоколів для реалізації комплексного підходу. Крім того, важливе 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 можливостей окремих осіб і громад для ефективного прийняття та використання інтегрованої системи, максимізації її переваг та забезпечення довгострокової стійкості.

References/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?sequencej1>.
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., Ouidraogo J. C. W., Ouidraogo 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>.
8. 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).
9. 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>.
10. 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>.
11. 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/aqua2023.086>.
12. 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>.
13. 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>.
14. 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>.

15. 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>.
16. (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>.
17. 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
18. 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>.
19. 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>.
20. 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.
21. 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>.
22. 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>.
23. 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>.
24. 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>.
25. 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>.
26. 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. 102224. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102224>.
27. 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>.
28. 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 modelling approaches to make SODIS faster and safer. *Molecules*. 2021. V. 26 (11). 3431. <https://doi.org/10.3390/molecules26113431>.
29. 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>.
30. 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>.
31. 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>.
32. 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>.

Вперше надійшла до редакції 05.11.2023 р.
Рекомендована до друку на засіданні редакційної колегії після рецензування