

Оглядові статті

Review Articles

УДК 628.162: 613.34.: 502.65+546.134

DOI <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14539189>

СОНЯЧНА ДЕЗІНФЕКЦІЯ ВОДИ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ МЕТОД ІНАКТИВАЦІЇ ФЕКАЛЬНИХ БАКТЕРІЙ У ХОЛОДНОМУ КЛІМАТІ (ОГЛЯД)

**Вастьянов Р.С.¹, Мокієнко А.В.², Рожнова А.М.¹, Герасименко О.А.¹,
Совірда О.С.¹, Садовий К.К.¹**

¹Одеський національний медичний університет

²Національний університет «Острозька академія»

E-mail: rvastyanov@gmail.com

WATER SOLAR DISINFECTION AS AN EFFECTIVE METHOD OF FECAL BACTERIA INACTIVATING IN A COLD CLIMATE (REVIEW)

**Vastyanov R.S.¹, Mokienko A.V.², Rozhnova A.M.¹, Gerasymenko O.A.¹,
Sovirda O.S.¹, Sadoviy K.K.¹**

¹Odessa National Medical University

²Ostroh Academy National University

Summary/Резюме

An analysis of the literature has shown that temperatures below or near the minimums conducive to bacterial growth can also produce a synergistic sanitizing effect with solar radiation. The purpose of the study was justification the possibility of using solar disinfection of water in a temperate climate. The effectiveness of solar water disinfection (SODIS) in cool climates has been investigated. Although potential areas of domestic application are in low-income countries, the authors decided to test the performance of SODIS in the cold, humid continental (temperate) climate of southern Finland. A number of experiments with the same experimental design were also conducted in the Mediterranean (subtropical) climate of Spain. These experiments were conducted to be able to compare the feasibility of using SODIS in cold climates and in the conditions in which it is normally used, by comparing the time and dose required for disinfection. The results suggest that there may be a synergistic effect between low temperatures and SODIS, as, in terms of required dose, the disinfection of *E. coli* and enterococci was significantly accelerated as the temperature of the experiments decreased. This can be explained by the slower metabolism and thus slower UV-recovery mechanisms in mesophilic bacteria at low temperatures, especially if the temperature drops below or near the minimum temperatures for reproduction.

Key words: *drinking water, solar disinfection, coliforms, enterococci, inactivation, temperate climate*

Аналіз даних літератури показав, що температури, нижчі або близькі до мінімумів, що сприяють росту бактерій, можуть так само спричинити синергетичний дезінфікуючий ефект разом із сонячним випромінюванням. Метою дослідження є обґрунтування можливості використання сонячної дезінфекції води у помірному кліматі. Досліджено ефективність сонячної дезінфекції води (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. 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. 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 після впливу УФ-променів у мезофільних бактерій при низьких температурах, особливо якщо температура падає нижче або близько до мінімальних температур для розмноження.

Ключові слова: питна вода, сонячна дезінфекція, колі-форми, ентерококи, інактивація, помірний клімат

Відомо, що сонячна дезінфекція питної води (SODIS) є екологічно безпечним та ефективним методом інактивації збудників кишкових інфекцій [1]. Бактерії, що викликають захворювання в організмі людини (~37 °C), здебільшого є мезофільними, тобто вони можуть рости в діапазоні середніх температур 10–45 °C [2]. 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 [3, 4] або 50 °C [5–7]. 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 [2]. Wegelin et al. помітили, що якщо під час інактивації SODIS колі-форм температура води залишається вище 50 °C, доза ультрафіолетового випромінювання для такого ж ступеня дезінфекції, стає втричі нижчою порівняно з SODIS при температурах від 20 до 40 °C [5]. Ці автори також показали, що температура води нижче 55 °C не впливала на ентерококи. Необхідна доза ультрафіолетового випромінювання для певного рівня дезінфекції була зменшена вдвічі порівняно з нижчими температурами в їх дослідженні.

Подібним чином Vivar et al. виявили, що кінетика дезінфекції SODIS ентеро-

коків і *E. coli* не змінювалася, коли температура води залишалася між 15 °C і 40 °C [4]. 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. так само виявили, що інактивація SODIS *E. coli* сповільнюється, коли температура піднімається від 20 °C до 40 °C, причому її ефективність найменша при 40 °C серед досліджуваних температур (20–60 °C) [8]. 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 [8].

Цілком імовірно, що температури, нижчі або близькі до мінімумів, що сприяють росту бактерій, можуть так само спричинити синергетичний дезінфікуючий ефект разом із сонячним випромінюванням. Комбінований вплив температур < 15 °C і сонячних променів на мікроорганізми широко не вивчався. Rincyn і Pulgarin зауважили, що сприйнятливість *E. coli* до фотокаталітичної обробки зростала в зимових умовах (температура води 6–10 °C) [9]. Garcia-Fernandez et al. та Vivar et al. додатково вивчали ефективність SODIS при температурі води ~15 °C [10, 11]. Крім того, у модельних експериментах SODIS

із видами *Pseudomonas*, *Aeromonas* і *Enterobacter*, посилених перекисом водню, кращі результати отримані у холодній воді та при низькій інтенсивності сонячної радіації (5–7 °C, 13 Вт/м²) (Фінляндія) порівняно з умовами експериментів в Іспанії (31–32 °C, 44 Вт/м²) [12]. Однак, ефекти простого SODIS у воді з температурою нижче 15 °C ретельно не вивчалися. 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 гірських частинах Південної Америки.

В даний час SODIS вважається не ефективним у помірному кліматі. Наприклад, Moreno-SanSegundo et al. вважають, що застосування SODIS є сумнівним у регіонах із відносно низькими температурами та низьким УФ-випромінюванням [1]. Borde et al. також стверджують, що холодна погода є обмеженням ефективності SODIS [13].

Поліетиленові пакети як простого та недорогої контейнери для SODIS [14, 15]. Вони також краще піддаються дезінфекції, ніж звичайні ПЕТ (поліетилентерефталатні) пляшки [15, 16]. Нарешті, ПЕ-пакети були визнані безпечними для SODIS через низьку хімічну реакційну здатність матеріалу. Наприклад, Danwittayakul et al. виявили, що після дванадцяти тижнів щоденного використання SODIS у поліетиленових пакетах рівні міграції органічних сполук у воду знаходились на рівні межі виявлення [17].

Метою дослідження є аналіз даних літератури щодо обґрунтування можливості використання сонячної дезінфекції води як ефективного методу інактивації фекальних бактерій у холодному кліматі.

Матеріали і методи дослідження

Дослідження здійснено за допомогою бібліометричного та аналітичного

методів, а також методу системного аналізу.

Результати досліджень та їх обговорення

Метою дослідження [18] було визначення ефективності 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 джерельна вода, забруднена «дикими» фекальними бактеріями, піддавалася впливу природного сонячного світла в поліетиленових пакетах 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 пакета 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 BOOЗ з оцінки очищення води в домашніх умовах [19]. Стічні води, що використовували 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 питної води та відфільтрованої (25

мкл) стічної води (0,1–1 % об'єм/об'єм) готували таким чином, щоб початкові концентрації загальних колі-форм 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 березня 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 для SODIS. Цей вибір був зумовлений більш високим коефіцієнтом пропускання UVB-випромінювання пакетів у порівнянні із ПЕТ-пляшками.

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 пакет знімався з сонячного світла для культивування бактерій і реєструвалися температура повітря, температура води та інтенсивність радіації. Температуру повітря вимірювали термометром, покладеним біля пакетів. 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 під час експериментів до 16 мм $\pm$ 2 мм товщини шару води в положенні лежачи.

Експерименти SODIS проводили 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 (1), представленої Gutierrez-Alfaro et al. [15]:

$$Q_{uv} = Q_{uv-1} + UV_n \cdot t_n - t_{n-1} \quad (1)$$

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 , t_{n-1} — час у годинах у точці відбору проб $n - 1$.

Для культивування бактерій застосовували метод мембранної фільтрації в чотирьох повторях. Крім того, один пакет, 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 год після кожного експерименту. Мембранну фільтрацію згодом використовували для реєстрації можливої реактивації бактерій після SODIS.

Відсоток реактивації розраховували за формулою (2), представленою Lindenauer and Darby [20]:

$$\text{reactivation\%} = 100\% \cdot (N_t - N_0) / (N_0 - N)$$

де N_t концентрація 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).

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 °C, 10 °C, 20 °C або 43 °C у поліетиленових пакетах у термостатах при цих температурах або в холодильнику при 4 °C. Температуру вимірювали на початку перед додаванням стічної води та в кожну точку часу відбору за допомогою термометра в поліетиленовому пакеті, ідентичному пакетам 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 °C зберігали на льоду в холодильнику, а пакет із зразком при 20 °C зберігали при кімнатній температурі (20 °C ± 1 °C). Культивування бактерій проводили ідентично дослідом SODIS.

Для аналізу зразків в усіх експериментах використовували метод мембранної фільтрації. Зразки висівали в чотирьох повторях, за винятком тих, у яких межа виявлення була близькою; зразки з темних тестів висівали у двох повторях. Кількісне визначення колоній проводили після інкубації протягом 24 годин (загальна кількість колі-форм) або 48 годин (ентерококи) при 37 °C. 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 забезпечення GlnaFiT, розробленого Geeraerd et al. [21]. 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 R^2 . За допомогою програмного забезпечення GlnaFiT були розраховані дози, необхідні для 2-log і 4-log інактивації, а також час для досягнення 4-log інактивації.

2. Умови проведення дослідів SODIS та склад питної води

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

Питна вода (99 % об./об. у тестовій воді), яка використовувалася в Іспанії, була дещо жорсткішою, ніж вода у Фінляндії. Стаття Rommozzi et al. [22] описує, як на SODIS впливають різні іони в їх типових концентраціях для природних вод, таких як озера та річки. Згідно цих даних, NO_3^- (є" 30 мг/л), NO_2^- (є" 0,1 мг/л) та Cl^- (є" 10 мг/л) можуть підвищувати ефективність SODIS при інактивації *E. coli* у відповідних концентраціях, тоді як SO_4^{2-} не впливає навіть при найвищій дослідженій концентрації (500 мг/л).

Отже, у цих експериментах питна вода, яка використовувалася в Іспанії, могла дещо 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 [22].

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.

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 °C і середньою інтенсивністю 19 Вт/м². 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 °C, середня інтенсивність 42 Вт/м²), проведений в Іспанії, показує набагато нижчу ефективність загальної інактивації колі-форм 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 °C, середня інтенсивність 16 Вт/м²). 4-log інактивація в експерименті Low T & Med I, проведеному у Фінляндії, була досягнута за допомогою дози (25 Вт·год/м²), що становить менше половини дози (53 Вт·год/м²), необхідної для експерименту High T & I, проведеного в Іспанії. На основі результатів Gutierrez-Alfaro et al. [23], необхідна доза SODIS для 4-log зниження *E. coli* у питній воді становить ~35 Вт·год/м² у поліетиленових пакетах (температура води 18–28 °C, інтенсивність 20–35 Вт/м²). 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 сонячного світла в експерименті 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 °C, 39 °C та 48 °C відповідно [2]. Таким чином, температура води в експерименті High T & I (максимальна 41 °C, середнє значення 38 °C) 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 в усіх експериментах. Подібним чином Vivar et al. [4] виявили, що інактивація SODIS (середня інтенсивність 45 Вт/м²) *E. coli* у відфільтрованих стічних водах сповільнилася, коли температури експерименту залишалися між 40 °C і 45 °C. Giannakis та ін. [8] також повідомили про подібні результати під час вивчення впливу температур від 20 °C до 60 °C на інактивацію *E. coli* SODIS (сумарна сонячна інтенсивність 800 Вт/м² і 1200 Вт/м²) у синтетичних вторинних стоках: дезінфекція була найслабша при 40 °C. Природно, порівняно з даною тестовою водою, вміст поживних речовин значно відрізнявся в синтетичних матрицях стічних вод, які використовували Giannakis et al. [8] та Vivar et al. [4]. 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 температури води на досліди важко. Villar-Navarro et al. [12] 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 зна-

чення 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 [2] і зниження виробництва білків для метаболізму [24]. 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.

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 [5, 23, 25]. Ця відмінність між дезінфікуючими дозами ультрафіолетового опромінення, ймовірно, пов'язана з тим, що грам-позитивні бактерії, такі як ентерококи, мають товстішу та міцнішу клітинну стінку порівняно з грамнегативними бактеріями, такими як кишкова паличка [9, 26, 27].

Більша довжина плеча кривої ентерококів в експерименті High T & I порівня-

но 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 °C, 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 °C, 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-логарифмічна 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-Fernandez et al. [27] повідомляли, 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 °C і 20–35 Вт/м² (15) і 41 °C і 30–50 Вт/м² [27]. Подібно до даного дослідження [18], у вищезазначених роботах використовувалися бідні на поживні речовини водні матриці (бутильована питна 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-Fernandez et al. [27].

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. [15] і Figueredo-Fernández et al. [27]. Відповідні мінімальна, оптимальна та максимальна температури ентерококів, розраховані за допомогою моделі Rosso, складають приблизно 7 °C, 43 °C та 48 °C відповідно [28]. 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 °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 джерела вказують на те, що оптимальна температура для росту бактерій не завжди може бути оптимальною для їхнього виживання [29]. Lessard і Sieburth [30], наприклад, поміти-

ли, 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 (0–20 °C), найкраще виживали при низьких температурах. Крім того, згідно з деякими дослідженнями, холодостійкість розвивається у ентерококів, якщо вони інкубуються при низьких плюсових температурах (8–16 °C), і ця толерантність збільшується, якщо тривалість цього інкубаційного періоду продовжується [31].

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 даному дослідженні [18] 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 Вт·год/м²), 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). Вірогідно, що низька інтенсивність і нешкідлива температура води в експерименті додатково дозволили спостерігати незначну фоторепарацію ентерококів і загальних коліформ.

Levchuk et al. [32] повідомили про значно вищу (< 5 %) реактивацію загальної кількості коліформ 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 коліформ 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 коліформ (~8–48 °C) [2] та ентерококів (~7–48 °C) [23] в експерименті Low T & Med I (6–14 °C).

Як зазначено вище, метаболічні функції бактерій могли бути настільки пошкоджені холодом [2, 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, декілька бактерій вижили. Іншою можливою причиною реактивації загальних коліформ в експерименті Med T & Low I є те, що початкові відповідні концентрації загальних коліформ і ентерококів були на ~ 0,8 log і ~ 1,7 log більшими, ніж у експерименті Low T & Med I. Тим не менш, Giannakis et al. [8] 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 Вт·год/м²), секвенували. Виявилось, 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. [33]. Автори також відзначили, що види цього роду можуть розвивати та виконувати ефективні механізми фоторепарації після

впливу ультрафіолету. Для порівняння, Santos et al. [34] 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.

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

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 залишалися в межах $\pm 0,5 \log$ від початкових концентрацій. Температура 20 °C тесту в темряві знаходилася в межах кардинальних діапазонів кишкової палички та ентерококів, тоді як температура 10 °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 °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 (6–14 °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 [2, 23], що робить бактерії менш здатними відновлювати пошкодження УФ-променя-

ми. 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 [2].

3.5 Термічний контроль бактеріальної інактивації: тест у темряві при 43 °C

Експериментальний час і температуру цього темнового тесту було вибрано так, щоб відповідати максимальній температурі (43 °C) 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 ($\sim 2,6 \log$) спостерігалася через 4 години (240 хвилин). Це дещо несподівано, оскільки відповідні мінімальна, оптимальна та максимальна температури *E. coli* та інших фекальних (тобто термостійких) колі-форм становлять приблизно 8 °C, 39 °C та 48 °C відповідно [2]. 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 [2]. Проте вже відомо, що температура 45 °C має синергічний ефект з УФ-випромінюванням на деякі колі-форми під час застосування SODIS [3, 4].

Отримані результати [18] показують, що цей синергетичний ефект може початися при дещо нижчій температурі, ніж спостерігалось раніше. Ubomba-Jaswa et al. [35] 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 темнового тестування води при 45 °C.

Giannakis et al. [8] також виявили, що не було різких змін у концентраціях *E. coli* у синтетичних вторинних стоках, коли температура залишалася між 20 °C і 40 °C протягом 4 годин. Тим не менш, при 50 °C 3-log інактивація *E. coli* відбулася через 2,5–3 години. Іншим додатковим поясненням помітної дезінфекції загальної кількості колі-форм у даному дослідженні [18] може бути те, що інактивована субпопуляція колі-форм не складалася з термотолерантних.

Навпаки, тест у темряві при температурі 43 °C викликав менш ніж 0,25-log інактивацію в ентерококах. Ця температура відповідала їхньому оптимуму, ~43 °C [23], тому вони розмножуються в умовах експерименту. Ентерококи вважаються певною мірою термостійкими і сильний синергічний ефект випромінювання та тепла, ймовірно, значний лише при температурах, що перевищують 55 °C [5].

4. Попередня оцінка вартості SODIS в поліетиленових пакетах

В цьому дослідженні були оцінені річні витрати домогосподарства на використання поліетиленових пакетів 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. Можна використовувати для зручності більші пакети. Оскільки доведено, що більші контейнери, навіть із набагато товщим шаром води, мають подібну дезінфекційну ефективність порівняно з меншими [36]. Швидка дезінфекція все ще може бути досягнута за допомогою поліетиленових пакетів після п'яти місяців використання [16]. В цьому дослідженні комерційні багаторазові поліетиленові пакети, придбані у фінському супермаркеті за 0,08 євро за штуку.

Порівняно з Фінляндією поліетиле-

нові 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 Gutierrez-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. В усіх експериментах SODIS як у вологій континентальній, так і в середземноморській кліматичній зонах була досягнута інактивація принаймні на 4-log (> 99,99 %) ентерококів і загальних коліформ. 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 [19] 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 коліформ 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.

Висновки:

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.

References

1. Moreno-SanSegundo J, Giannakis S, Samoilis S, Farinelli G, McGuigan KG, Pulgarin C, Marugán J. SODIS potential: a novel parameter to assess the suitability of solar water disinfection worldwide. *Chemical Engineering Journal*. 2021; 419: 129889. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129889>
2. Madigan MT. *Brock Biology of Microorganisms* (15th edition, Global edition). New York: Pearson, 2017: 89-92, 188-189.
3. McGuigan KG, Joyce TM, Conroy RM, Gillespie JB, Elmore-Meegan M. Solar disinfection of drinking water contained in transparent plastic bottles: characterizing the bacterial inactivation process. *J Appl Microbiol*. 1998; 84 (6): 1138-1148. doi: 10.1046/j.1365-2672.1998.00455.x
4. Vivar M, Pichel N, Fuentes M. Solar disinfection of natural river water with low microbiological content ($10-10^3$ CFU/100 ml) and evaluation of the thermal contribution to water purification. *Sol. Energy*. 2017; 141: 1-10.
5. Wegelin M, Canonica S, Mechsner K, Fleischmann T, Pesaro F, Metzler A. Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. *Aqua* 1994; 43 (3): 154-169.
6. Sommer B, Marino A, Solarte Y, Salas ML, Dierolf C, Valiente C. et al. SODIS — an emerging water treatment process. *Aqua (Oxford)*. 1997; 46 (3): 127-137.
7. Joyce TM, McGuigan KG, Elmore-Meegan M, Conroy RM. Inactivation of fecal bacteria in drinking water by solar heating. *Appl. Environ. Microbiol*. 1996; 62 (2): 399-402.
8. Giannakis S, Darakas E, Escalas-Cacellas A, Pulgarin C. The antagonistic and synergistic effects of temperature during solar disinfection of synthetic secondary effluent. *J. Photochem. Photobiol. A Chem*. 2014; 280: 14-26.
9. Rincyn AG, Pulgarin C. Field solar E. Coli inactivation in the absence and presence of TiO_2 : is UV solar dose an appropriate parameter for standardization of water solar disinfection? *Sol. Energy*. 2004; 77 (5): P. 635-648.
10. Garsna-Fernandez I, Fernandez-Calderero I, Polo-Lopez MI, Fernandez-Ibáñez P. Disinfection of urban effluents using solar TiO_2 photocatalysis: a study of significance of dissolved oxygen, temperature, type of microorganism and water matrix. *Catal. Today*. 2015; 240: 30-38.
11. Vivar M, Pichel N, Fuentes M, Lopez-Vargas A. Separating the UV and thermal components during real-time solar disinfection experiments: the effect of temperature. *Sol. Energy*. 2017; 146: 334-341.
12. Villar-Navarro E, Levchuk I, Rueda-Marquez JJ, Homola T, Moricigo MA, Vahala R, Manzano M. Inactivation of simulated aquaculture stream bacteria at low temperature using advanced UVA-and solar-based oxidation methods. *Sol. Energy*. 2021; 227: 477-489.
13. Borde P, Elmusharaf K, McGuigan KG, Keogh MB. Community challenges when using large plastic bottles for solar energy disinfection of water (SODIS). *BMC Public Health*. 2016; 16 (1): 931.
14. McGuigan KG, Conroy RM, Mosler H-J, du Preez M, Ubomba-Jaswa E, Fernandez-Ibáñez P. Solar water disinfection (SODIS): a review from bench-top to roof-top. *J. Hazard. Mater*. 2012; 235-236: 29-46. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.07.053
15. Gutierrez-Alfaro S, Acevedo A, Figueredo M, Saladin M, Manzano MA. Accelerating the process of solar disinfection (SODIS) by using polymer bags. *J Chem Technol Biotechnol*. 2017; 92 (2): 298-304.
16. Lawrie K, Mills A, Figueredo-Fernandez M, Gutierrez-Alfaro S, Manzano M, Saladin M. UV dosimetry for solar water disinfection (SODIS) carried out in different plastic bottles and bags. *Sensors Actuators B Chem*. 2015; 208: 608-

- 615.
17. Danwittayakul S, Songngam S., Fhulua T, Muangkasem P, Sukkasi S. Safety and durability of low-density polyethylene bags in solar water disinfection applications. *Environ. Technol.* 2017; 38 (16): 1987-1996.
18. Juvakoski A, Singhal G, Manzano MA, Moricigo MA, Vahala R, Levchuk I. Solar disinfection — An appropriate water treatment method to inactivate faecal bacteria in cold climates. *Science of The Total Environment.* 2022; 827: 154086. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154086
19. 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>.
20. Lindenauer KG, Darby JL. Ultraviolet disinfection of wastewater: effect of dose on subsequent photoreactivation. *Water Res.* 1994; 28 (4): 805-817.
21. Geeraerd AH, Valdramidis VP, Van Impe JF. GlnaFit, a freeware tool to assess non-log-linear microbial survivor curves. *Int J Food Microbiol* 2005; 102 (1): 95-105. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2004.11.038.
22. Rommozzi E, Giannakis S, Giovannetti R, Vione D, Pulgarin C. 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. *Appl Catal. B Environ.* 2020; 270: 118877. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.118877>
23. Gutierrez-Alfaro S, Acevedo A, Rodriguez J, Carpio EA, Manzano MA. Solar photocatalytic water disinfection of *Escherichia coli*, *Enterococcus* spp. and *Clostridium perfringens* using different low-cost devices. *J Chem Technol Biotechnol.* 2016; 91 (7): 2026-2037.
24. 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.
25. Levchuk I, Homola T, Moreno-Andres J, Rueda-Marquez JJ, Dzik P, Moricigo MA et al. Solar photocatalytic disinfection using ink-jet printed composite $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ thin films on flexible substrate: applicability to drinking and marine water. *Sol Energy.* 2019; 191: 518-529.
26. Gomes AI, Vilar VJ, Boaventura RA. Synthetic and natural waters disinfection using natural solar radiation in a pilot plant with CPCs. *Catal Today.* 2009; 144 (1-2): 55-61.
27. Figueredo-Fernandez M, Gutierrez-Alfaro S, Acevedo-Merino A, Manzano MA. Estimating lethal dose of solar radiation for *Enterococcus* inactivation through radiation reaching the water layer. Application to solar water disinfection (SODIS). *Sol Energy.* 2017; 158: 303-310.
28. 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; 107 (2): 159-170.
29. Rozen Y, Belkin S. Survival of enteric bacteria in seawater. *FEMS Microbiol. Rev.* 2001; 25 (5): 513-529.
30. Lessard EJ, Sieburth JM. Survival of natural sewage populations of enteric bacteria in diffusion and batch chambers in the marine environment. *Appl Environ Microbiol.* 1983; 45 (3): 950-959.
31. Thammavongs B, Corroler D, Panoff J-M, Auffray Y, Boutibonnes P. Physiological response of *Enterococcus faecalis* JH2-2 to cold shock: growth at low temperatures and freezing/thawing challenge. *Lett Appl Microbiol.* 1996; 23 (6): 398-402.
32. Levchuk I, Kralova M, Rueda-Marquez JJ, Moreno-Andres J, Gutierrez-Alfaro S, Dzik P. et al. Antimicrobial activity of printed composite $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ and $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Au}$ thin films under UVA-LED and natural solar radiation. *Appl Catal B Environ.* 2018; 239: 609-618.
33. Zenoff VF, Siceriz F, Farias ME. Diverse responses to UV-B radiation and repair mechanisms of bacteria isolated from high-altitude aquatic environments. *Appl Environ Microbiol.* 2006; 72 (12): 7857-7863.
34. Santos AL, Oliveira V, Baptista I, Henriques I, Gomes NCM, Almeida A et al. Wavelength dependence of biological damage induced by UV radiation on bacteria. *Arch Microbiol.* 2013; 195 (1): 63-74.
35. Ubomba-Jaswa E, Navntoft C, Inmaculada Polo-Lopez M, Fernandez-Ibanez P, McGuigan KG. Solar disinfection of drinking water (SODIS): an investigation of the effect of UV-A dose on inactivation efficiency. *Photochem. Photobiol. Sci.* 2009; 8 (5): 587-595.
36. Keogh MB, Castro-Alferez M, Polo-Lopez MI, Fernandez Calderero I, Al-Eryani YA, Joseph-Titus C. et al. Capability of 19-L polycarbonate plastic water cooler containers for efficient solar water disinfection (SODIS): field case studies in India, Bahrain and Spain. *Sol Energy.* 2015; 116: 1-11.

*Вперше надійшла до редакції 27.09.2024 р.
Рекомендована до друку на засіданні
редакційної колегії після рецензування*