

УДК 628.162: 613.34.: 502.65+546.134

DOI: <https://zenodo.org/records/15648821>

ГЕТЕРОТРОФНІ МІКРООРГАНІЗМИ У СИСТЕМАХ РОЗПОДІЛУ ПИТНОЇ ВОДИ

**Горошков О.В.¹, Мокієнко А.В.², Солтик С. М.¹, Дубовик С. Л.¹,
Садовий К.К.¹, Красікова Д.Р.¹**

¹Одеський національний медичний університет

²Національний університет «Острозька академія»

E-mail: mokienkoav56@gmail.com

HETEROTROPHIC MICROORGANISMS IN DRINKING WATER DISTRIBUTION SYSTEMS

**Horoshkov O.V.¹, Mokienko A.V.², Soltyk S.M.¹, Dubovyk S. L.¹,
Sadoviy K.K.¹, Krasikova D.R.¹**

¹Odessa National Medical University

²Ostroh Academy National University

E-mail: mokienkoav56@gmail.com

Summary/Резюме

The aim of the review was to analyze the literature data on heterotrophic microorganisms in drinking water (HPC) to evaluate the use of this indicator for monitoring biological stability and factors affecting its level. The relationship between the number of HPC colonies and various physical and chemical parameters in water distribution systems was demonstrated. It was shown that disinfectant alone cannot prevent the formation of biofilm in water distribution systems. The influence of water treatment, temperature and residence time on HPC levels was established and the need for an integrated approach to HPC control due to the presence of many variables was presented. The cumulative evidence on the lack of standardization in the use of HPC as a tool for monitoring drinking water quality was presented. The use of HPC as an adequate parameter for monitoring biological stability of water and changes in its quality in distribution systems was justified.

Key words: *biological stability, heterotrophic plate count, microbial water quality, water distribution system.*

Мета огляду полягала в аналізі даних літератури щодо необхідності визначення гетеротрофних мікроорганізмів (НРС) у питній воді для оцінки використання цього показника для моніторингу біологічної стабільності та факторів, що впливають на її рівень. Продемонстровано зв'язок між кількістю колоній НРС і різними фізичними та хімічними параметрами в системах розподілу води. Показано, що сам дезінфікуючий засіб не може запобігти утворенню біоплівки в системах розподілу води. Встановлено вплив очищення води, температури та час перебування на рівень НРС та необхідність інтегрованого способу контролю НРС внаслідок наявності багатьох змінних. Представлено сукупні докази щодо відсутності стандартизації при використанні НРС як інструменту для моніторингу якості питної води. Обґрунтовано використання НРС як адекватного параметру для моніторингу біологічної стійкості води та змін її якості в системах розподілу.

Ключові слова: *біологічна стабільність, число гетеротрофних мікроорганізмів, мікробна якість води, система водорозподілу.*

Системи питної води (DWSS) — це динамічне середовище, яке може містити велику різноманітність мікробних спільнот [1]. Характеристики, що стосуються виробництва та розподілу питної води, включаючи структурні та операційні параметри, сезонні та часові зміни та доступність органічних та неорганічних поживних речовин, можуть впливати на склад мікробної спільноти [2, 3]. Завдяки фізичній, хімічній та мікробіологічній взаємодії системи питної води є сприятливими місцями розмноження бактерій від точки входу в систему розподілу до споживчого крана. Переривчасті системи водопостачання (IWS) (коли вода доступна менше 24 години/добу) та/або системи транспортування питної води (наприклад, автоцистерни) особливо вразливі до повторної контамінації [4]. Незважаючи на процеси очищення питної води, такі як первинна та вторинна дезінфекція, а також експлуатаційне та структурне обслуговування, ріст мікробів та біоплівки можуть вимагати підвищення залишкового дезінфікуючого засобу [5].

Моніторинг якості питної води включає широкий спектр параметрів, який може змінюватись на різних рівнях відповідно до норм та стандартів питної води [6]. Для оцінки наявності мікроорганізмів у необробленій та питній воді можна використовувати кілька параметрів та індикаторів. Як правило, фекальні колі-форми та кишкова паличка визнаються найбільш поширеними та/або фекальними показниками. Однак, також широко застосовується загальне мікробне число (НРС), яке включає гетеротрофні бактерії, що використовують органічні поживні речовини для росту [7].

Попередні дослідження поставили під сумнів чутливість та специфічність вимірювань НРС, підкреслюючи, що різні методи виявлення можуть призвести до широкого діапазону концентрацій, від $< 0,01$ до 10^4 КУО/мл [7].

Наразі немає єдиної думки щодо актуальності НРС у програмах контролю якості води. ВООЗ вважає, що НРС без-

посередньо не виявляє потенційного несприятливого впливу на здоров'я людини [8]. Однак попередні дослідження показали, що високий рівень НРС відображає стан мережі розподілу, наявність поживних речовин для умовно-патогенних мікроорганізмів (наприклад, асиміляційного органічного вуглецю (АОС), розчиненого органічного вуглецю, що біологічно розкладається (BDOC) та їх потенціалів для сприяння певному інфекційному забрудненню води [9]. Наприклад, було виявлено сильну кореляцію НРС та умовно-патогенних збудників в біоплівці [10]. Крім того, низький рівень НРС в системі дозволяє припустити, що інші збудники, такі як загальна кишкова паличка та *Pseudomonas spp.* ймовірно, відсутні або присутні на невизначених рівнях [11]. Також немає консенсусу щодо ефективності НРС як індикатора. Наприклад, деякі автори продемонстрували, що НРС лише демонструє дуже невелику частку бактерій (живих та неживих) порівняно з іншими методами оцінки біомаси бактерій, таких як проточна цитометрія або аналіз АТФ [3, 12].

Проточна цитометрія (flowcytometry) — це метод, який аналізує та сортує клітини за їхніми фізичними та хімічними характеристиками за допомогою лазерного променя та флуоресцентних барвників. Він дозволяє швидко аналізувати великі популяції клітин і широко використовується в дослідженнях та клінічній практиці.

Аналіз АТФ (аденозинтрифосфату) — це метод, який використовується для оцінки мікробної активності шляхом вимірювання кількості АТФ у зразку. АТФ — це молекула, що переносить енергію, яка міститься у всіх живих клітинах, включаючи мікроби. Оскільки АТФ відсутній у мертвих клітинах, його вимірювання забезпечує пряме та швидке визначення кількості присутніх живих мікробів.

Положення про моніторинг гетеротрофних бактерій у питній воді різняться по всій Північній Америці. Наприклад, Агентство охорони навколишнього природного

середовища США (США EPA) вказує на кількість НРС 500 КУО/мл за допомогою підходу до техніки обробки ("ТТ") [13]. Тим часом, Health Canada пропонує вказівки щодо канадської якості питної води, що рекомендують використовувати НРС як параметр для мікробіологічного моніторингу, але не повідомляє про конкретні рівні НРС. Кілька систем громадського водопостачання продовжують проводити аналіз НРС для моніторингу загальної бактеріологічної якості у своїх мережах. Попередні дослідження підтримують використання НРС як інструменту для оцінки змін у системі постачання [7, 8, 14], а також використання НРС для моніторингу питної води. Однак, у жодному випадку не оцінено широкий спектр кількості колоній та варіацій НРС та те, як вони стосуються характеристик та експлуатаційних умов систем водопостачання питної води, включаючи обробку води та процеси розподілу.

Загальна мета всебічного огляду [15] — оцінити обґрунтованість використання НРС як показника для біологічної стабільності питної води та характеристики можливого сприяння НРС інтегрованій системі контролю якості води в системах розподілу. Конкретні цілі полягали в тому, щоб (1) надати огляд рівнів НРС у різних системах розподілу, (2) оцінити взаємозв'язок між основними фізико-хімічними властивостями води та біологічною стійкістю відповідно до кількості НРС та (3) визначити роль НРС як контрольного показника для мікробіологічної активності та загальної якості води.

Початковий пошук дав 839 результатів, з яких 444 показали на відповідні заголовки та реферати після видалення дуплікатів. Повні тексти 95 придатних статей оцінювались на відповідність до критеріїв включення, а 56 були виключені. Зрештою, для якісного та кількісного аналізу було включено 39 статей.

Дослідження проводилися на муніципальних або громадських системах питного водопостачання з усіх регіонів світу, класифікованих Світовим банком.

Більшість досліджень проводилися в Європі та Центральній Азії (15 досліджень), Північній Америці (13), Східній Азії та Тихому океану (п'ять). Інші дослідження проводилися в Південній Азії (два), на Близькому Сході та Північній Африці (два) та латинській Америці (одне). Місце для одного дослідження не було вказано. Загалом 82 % досліджень (32) проводили в економіках з високим рівнем доходу. Решта досліджень проводилися в економіках низького та вище середнього доходу, таких як Бразилія, Китай, Єгипет, Індія та Пакистан, де частіше є системи водопостачання (16). Дослідження проводилися в різних за розмірами системах на основі чисельності популяції, причому деякі дослідження, включали багато систем. Більше половини досліджень включали великі міста (22 дослідження), тоді як інші проводилися в середніх та/або малих населених пунктах (d" 99 999 жителів).

У вибраних дослідженнях поверхнева вода була найпоширенішим джерелом води порівняно з підземними або джерельними водами. Декілька робіт досліджували лише якість водопровідної води [17-19], однак більшість досліджень досліджували якість води від джерела до крана. Схеми очищення води були різними. Найбільш поширеними були коагуляція/флокуляція/седиментація та/або фільтрація на активному вугіллі (16 досліджень). Лише в декількох дослідженнях використовували передові методи, такі як ультрафільтрація або нанофільтрація [18, 20]. Також була поширеною озонування (вісім). УФ-дезінфекція використовувалася в поєднанні з озоном або поодиноці в кількох дослідженнях. П'ятнадцять відсотків серед усіх досліджень не використовували вторинну дезінфекцію, тоді як 85 % використовували для цього хлорамін або хлор для первинного та/або вторинного знезараження.

В цілому в даному огляді [15] в системах з та без вторинної дезінфекції виявлено різні рівні НРС [8, 21-23]. Хоча мінливість в системах постачання поширена, результати літератури говорять про

те, що аномальне підвищення рівня НРС може вказувати на можливе погіршення якості води та/або інфраструктури в системі розподілу.

Результати метааналізу [15] підкреслюють важливість використання мультипараметрового підходу, оскільки жоден окремий параметр не може вважатися тільки однією причиною розмноження мікробів у водорозподільних мережах. Не було виявлено суттєвої різниці в кількості колоній НРС між хлорованими та нехлорованими системами. Висновки свідчать про те, що достатня концентрація хлору може допомогти інактивувати НРС в конкретних умовах, таких як ті, що стосуються температури води та часу перебування [18]. Це пояснюється тим, що НРС, як правило, збільшується в мережі перед споживчим краном [24, 25]. Такі параметри, як температура, час транспортування води, гідравлічні умови, матеріал та розмір труб, обмеження поживних речовин можуть вплинути на біологічну стійкість води. Зміни в кількості колоній НРС також можуть допомогти визначити вразливі сектори з тривалим часом перебування, більш високими температурами та/або низьким тиском. Це особливо актуально для країн з низьким та середнім рівнем доходу, де системи швидше є переривчастими з розривом потоку та негативним тиском [26]. Розмноження бактерій у системах розподілу домогосподарств, як хлорованих, так і нехлорованих, часто не досліджується та не реєструється [24, 25, 27]. Також, в окремих домогосподарствах слід враховувати температуру води, час перебування, матеріал та діаметр труб [3].

У системах, де вода розподіляється без дезінфікуючого засобу, контроль рівня АОС також допомагає запобігти росту мікроорганізмів [28, 29]. Біологічно стабільну воду можна частково отримати шляхом підтримки концентрації АОС менше 10 мкг/л, на відміну від 50-100 мкг/л, що спостерігається в деяких хлорованих системах [30, 31]. Видалення органічної речовини можна досягти за допомогою

багатогранного підходу, наприклад, застосовуючи попереднє моделювання для проектування водних систем, забезпечення високих швидкостей потоку та регулярного промивання в конкретних умовах [32]. Результати інших досліджень також вказують на важливість зменшення органічної речовини для міні-моделювання побічних продуктів дезінфекції (ТНМ та НАА) у хлорованих системах розподілу [33, 34]. Дійсно, попередні дослідження та результати цього метааналізу [15] виявили кореляцію між НРС та АОС, посилюючи важливість контролю обох параметрів [35]. Тим не менш, важливо зазначити неможливість впливу виключно одного параметра на рівні НРС внаслідок одночасної взаємопов'язаної дії кількох факторів. Цей метааналіз [15] виявив кореляцію між НРС та АОС в дослідженнях із різними системами очищення, джерелами води та умовами експлуатації. Тобто, це певною мірою універсальна залежність.

Дані цього огляду [15] свідчать про взаємозв'язок між кількістю колонії НРС та наявністю умовно-патогенних збудників у DWSS, включаючи *Legionella spp.* і *Mycobacterium spp.* [36, 37]. Навпаки, в дослідженні Donohue [19] не знайдено узгодженості між рівнем НРС та наявністю *L. pneumophila*, при цьому НРС вважався лише предиктором. Більш високі рівні НРС, як правило, допоможуть передбачити наявність *Legionella spp.*, але в міру збільшення НРС розмноження *Legionella spp.* інгібується [19]. Однак, інші дослідження виявили, що високі кількості колоній НРС можуть бути корисними для визначення наявності *L. pneumophila* в охолоджувальних вежах [38-40]. Такі висновки свідчать про те, що НРС та *L. pneumophila* можуть мати подібні реакції на умови навколишнього середовища та параметри в системах розподілу питної води, таких як температура води (ріст *L. pneumophila* відбувається між 20 і 50 °C) та рівень залишкового хлору. Також повинні бути враховані інші важливі параметри, включаючи стагнацію та час перебування [41].

Крім того, дослідження мікробіологічної якості питної води не виявили зв'язку між НРС та іншими фекальними показниками, включаючи *E. coli* та загальні коліформи. Слід зазначити, що попередні дослідження виявили, що гетеротрофні бактерії на рівнях, що перевищують 500 КУО/мл, можуть перешкоджати розмноженню загальних коліформ та *E. coli* [7]. В існуючій літературі немає суттєвих доказів щодо асоціації НРС із збільшенням ризиків для здоров'я. Раніше лабораторні дані показали відсутність факторів вірулентності у бактерій НРС [42]. Ці результати узгоджуються з деякими ранніми епідеміологічними дослідженнями, які не виявили зв'язку між НРС та гастроентеритом [43].

Цей огляд [15] включав лише дослідження, які використовували стандартні культуральні методи на різних поживних середовищах. У літературі представлений широкий спектр процедур для визначення НРС, включаючи тих, хто має різну температуру та час інкубації. Інкубація при температурі 35-37 °C та короткий інкубаційний період 34-48 год сприяє росту бактерій від тварин і людини, тоді як мікроорганізми, які живуть у воді, культивуються низькотемпературною інкубацією (20-28 °C) при тривалому періоді інкубації (5-7 днів) [7]. Різноманітність методів вимірювання НРС перешкоджає використанню НРС як значущого показника при порівнянні декількох систем. Потрібні подальші дослідження для оцінки різноманітних методів, визначених у цьому огляді літератури [15] для підрахунку НРС. Слід докладати зусиль для стандартизації цього процесу з метою більшої узгодженості та порівнянності.

Традиційні процедури водопідготовки неефективні щодо інактивації багатьох видів бактерій, які присутні у воді. Хоча є певна кореляція між кількістю колоній АОС та НРС, очевидно, що НРС не є індикатором для великої кількості бактерій [44]. Значення НРС на твердих поживних середовищах, як правило, представляють лише частку загальної бактеріальної по-

пуляції при вимірюванні за допомогою мікроскопічних методів, оскільки більшість бактерій питної води не можна легко вирощувати на звичайних носіях [8, 44, 45]. Цікавою альтернативою для вивчення чисельності бактерій та загальної концентрації клітин є проточна цитометрія [45]. Традиційні методи виявлення НРС не здатні ідентифікувати специфічні бактерії, включаючи умовно-патогенні штами, наприклад, *Aeromonas spp.*, *E. coli*, *Pseudomonas spp.* Менш ніж 1 % бактерій НРС мають можливі фактори вірулентності, з яких частка патогенів становить приблизно 0,01 % [8]. Ізоляція штамів бактерій НРС може дозволити ідентифікацію потенційних патогенів [46, 47].

Досі варто визначати рівень НРС під час обробки, зберігання та розподілу питної води для отримання корисної інформації про мікробіологічну якість води [48]. Оскільки рівні НРС відрізняються між системами та методами виявлення НРС (тип середовища, температура, дні інкубації), недоцільно визначати чіткі пороги для «безпечних» глобальних рівнів НРС, як це робиться для інших бактеріальних показників, таких як загальні коліформи. Тим не менш, результати авторів (15) показують, що НРС може бути життєздатним показником для оцінки бактеріальної популяції в конкретних умовах та визначення просторової та часової мінливості цих бактерій в одній системі розподілу. НРС може бути корисним аналітичним методом оцінки змін мікробних популяцій та визначення «гарячих точок» або аномальних бактеріальних змін у водній системі. Також можна оцінити біологічну стабільність у системах розподілу питної води, поєднуючи інші методи оцінки з моніторингом НРС. Ці методи включають клітинний аденозин трифосфат (АТРС) та вимірювання АОС, які надають корисну інформацію про кількість життєздатних, активних мікробних клітин [3, 33, 45, 49-51]. Моніторинг росту мікробів є важливою частиною контролю якості питної води від джерела води до споживчого крана [52]. Дотримання вимог плану безпеки води може

привести до меншої кількості випадків високого рівня НРС у питній воді [53].

Висновки

Цей огляд [15] представляє аналіз недавньої літератури про НРС та оцінює використання цього показника для моніторингу біологічної стабільності та факторів, що впливають на її рівень. Огляд демонструє зв'язок між кількістю колоній НРС і різними фізичними та хімічними параметрами в системах розподілу води. Результати свідчать про те, що сам дезінфікуючий засіб не може запобігти утворенню біоплівки в системах розподілу води [54]. Інші параметри, такі як очищення води, температура та час перебування, також впливають на рівень НРС. Внаслідок наявності багатьох змінних є необхідним інтегрований спосіб контролю НРС.

Представлені сукупні докази підтверджують попередні висновки про відсутність стандартизації при використанні НРС як інструменту для моніторингу якості питної води. Хоча немає жодних доказів, що свідчать про те, що НРС може бути використаний як індикатор якості води з точки зору впливу на здоров'я, за певних обставин НРС здається хорошим показником наявності різних мікроорганізмів. Однак сезонні та часові зміни систем розподілу води впливають на наявність гетеротрофних бактерій та інших мікроорганізмів. В цілому, НРС є адекватним параметром для моніторингу біологічної стійкості води та змін її якості в системах розподілу.

Література

1. Eichler, S., Christen, R., Holtje, C., Westphal, P., Botel, J., Brettar, I., Mehling, A. & Hofle Manfred, G. 2006 Composition and dynamics of bacterial communities of a drinking water supply system as assessed by RNA- and DNA-based 16S rRNA gene fingerprinting. *Applied and Environmental Microbiology* 72 (3), 1858-1872.
2. Scheili, A., Rodriguez, M. J. & Sadiq, R. 2015 Seasonal and spatial variations of source and drinking water quality in small municipal systems of two Canadian regions. *Science of the Total Environment* 508, 514-524.
3. Prest, E. I., Van Loosdrecht, M. C. M., Weissbrodt, D. G., Hammes, F. & Vrouwenvelder, J. S. 2016b Long-term bacterial dynamics in a fullscale drinking water distribution system. *PLoS ONE* 11 (10), e0164445.
4. Daley, K., Hansen, L. T., Jamieson, R. C., Hayward, J. L., Piorkowski, G. S., Krkosek, W., Gagnon, G. A., Castleden, H., MacNeil, K., Poltarowicz, J., Corriveau, E., Jackson, A., Lywood, J. & Huang, Y. N. 2018 Chemical and microbial characteristics of municipal drinking water supply systems in the Canadian Arctic. *Environmental Science and Pollution Research* 25 (33), 32926-32937.
5. Liu, S., Gunawan, C., Barraud, N., Rice, S. A., Harry, E. J. & Amal, R. 2016 Understanding, monitoring, and controlling biofilm growth in drinking water distribution systems. *Environmental Science & Technology* 50 (17), 8954-8976.
6. WHO 2021 A Global Overview of National Regulations and Standards for Drinking-Water Quality. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
7. Allen, M. J., Edberg, S. C. & Reasoner, D. J. 2004 Heterotrophic plate count bacteria — What is their significance in drinking water? *International Journal of Food Microbiology* 92 (3), 265-274.
8. Bartram, J., Cotruvo, J., Exner, M., Fricker, C. & Glasmacher, A. 2003 Heterotrophic Plate Counts and Drinking Water Safety: The Significance of HPCs for Water Quality and Human Health. IWA Publishing, London, UK.
9. Chowdhury, S. 2012 Heterotrophic bacteria in drinking water distribution system: A review. *Environmental Monitoring and Assessment* 184 (10), 6087-6137.
10. Pozos, N., Scow, K., Wuertz, S. & Darby, J. 2004 UV disinfection in a model distribution system: Biofilm growth and microbial community. *Water Research* 38 (13), 3083-3091.
11. Robertson, W. & Brooks, T. 2003 The role of HPC in managing the treatment and distribution of drinking water. In: Heterotrophic Plate Counts and Drinking-water Safety, Chapter 12 (Bartram, J., Cotruvo, J., Exner, M., Fricker, C. & Glasmacher, A., eds.). Published on behalf of the World Health Organization by IWA Publishing, London, UK, p. 25.
12. Hammes, F., Berney, M., Koster, O., Wang, Y., Vital, M. & Egli, T. 2008 Flow-cytometric total bacterial cell counts as a descriptive microbiological parameter for drinking water treatment processes. *Water Research* 42 (1-2), 269-277.
13. United States Environmental Protection Agency 2022 National Primary Drinking Water Regulations. Available from: <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-pri>

- mary-drinking-water-regulations
14. Ikonen, J., Pitkanen, T. & Miettinen, I. T. 2013 Suitability of optical, physical and chemical measurements for detection of changes in bacterial drinking water quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 10 (11), 5349-5363. <https://doi.org/10.3390/ijerph10115349>.
15. Carabin A, Cassivi A, Dorea C., Rodriguez M. & Huot C. 2024 Heterotrophic plate counts (HPC) in drinking water distribution systems: A comprehensive review and meta-analysis. *Water Quality Research Journal* 59 (3), 126 doi: 10.2166/wqrj.2024.027
16. Kumpel, E. & Nelson, K. L. 2016 Intermittent water supply: Prevalence, practice, and microbial water quality. *Environmental Science & Technology* 50 (2), 542-553.
17. Volker, S., Schreiber, C. & Kistemann, T. 2010 Drinking water quality in household supply infrastructure — A survey of the current situation in Germany. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 213 (3), 204-209.
18. Ohkouchi, Y., Yata, Y., Bun, R. & Itoh, S. 2014 Chlorine requirement for biologically stable drinking water after nanofiltration. *Water Science and Technology: Water Supply* 14 (3), 405-413.
19. Donohue, M. J. 2021 Quantification of *Legionella pneumophila* by qPCR and culture in tap water with different concentrations of residual disinfectants and heterotrophic bacteria. *Science of the Total Environment* 774, 145142.
20. Escobar, I. C. & Randall, A A 2001 Assimilable organic carbon (AOC) and biodegradable dissolved organic carbon (BDOC): Complementary measurements. *Water Research* 35 (18), 4444-4454
21. Uhl, W. & Schaule, G. 2004 Establishment of HPC (R2A) for regrowth control in non-chlorinated distribution systems. *International Journal of Food Microbiology* 92 (3), 317-325.
22. Xi, C., Zhang, Y., Marrs Carl, F., Ye, W., Simon, C., Foxman, B. & Nriagu, J. 2009 Prevalence of antibiotic resistance in drinking water treatment and distribution systems. *Applied and Environmental Microbiology* 75 (17), 5714-5718.
23. Zlatanovic, L., van der Hoek, J. P. & Vreeburg, J. H. G. 2017 An experimental study on the influence of water stagnation and temperature change on water quality in a full-scale domestic drinking water system. *Water Research* 123, 761-772.
24. Pepper, I. L., Rusin, P., Haney, C., Josephson, K. L., Gerba, C. P. & Quintanar, D. R. 2004 Tracking the concentration of heterotrophic plate count bacteria from the source to the consumer's tap. *International Journal of Food Microbiology* 92 (3), 289-295.
25. Inkinen, J., Kaunisto, T., Keinanen-Toivola, M. M., Pursiainen, A., Miettinen, I. T., Kusnetsov, J. & Riihinen, K. 2014 Drinking water quality and formation of biofilms in an office building during its first year of operation, a full scale study. *Water Research* 49, 83-91.
26. Tokajian, S. & Hashwa, F 2003 Water quality problems associated with intermittent water supply. *Water Science and Technology* 47 (3), 229-234.
27. Lautenschlager, K., Boon, N., Wang, Y., Egli, T. & Hammes, F. 2010 Overnight stagnation of drinking water in household taps induces microbial growth and changes in community composition. *Water Research* 44 (17), 4868-4877.
28. van der Kooij, D., Vrouwenvelder, J. S. & Veenendaal, H. R. 2003 Elucidation and control of biofilm formation processes in water treatment and distribution using the Unified Biofilm Approach. *Water Science and Technology* 47 (5), 83-90.
29. Liu, X., Wang, J., Liu, T., Kong, W., He, X., Jin, Y. & Zhang, B. 2015 Effects of assimilable organic carbon and free chlorine on bacterial growth in drinking water. *PLoS ONE* 10 (6), e0128825.
30. van der Kooij, D. 1992 Assimilable organic carbon as an indicator of bacterial regrowth. *Journal AWWA* 84 (2), 57-65.
31. LeChevallier, M. W., Welch, N. J. & Smith, D. B. 1996 Full-scale studies of factors related to coliform regrowth in drinking water. *Applied and Environmental Microbiology* 62 (7), 2201-2211.
32. Smeets, P. W. M. H., Medema, G. J. & van Dijk, J. C. 2009 The Dutch secret: How to provide safe drinking water without chlorine in the Netherlands. *Drinking Water Engineering and Science* 2 (1), 1-14.
33. Barrett, S. E., Krasner, S. W. & Amy, G. L. 2000 Natural organic matter and disinfection by-products: Characterization and control in drinking water — An overview. In: *Natural Organic Matter and Disinfection By-Products*, Vol. 761. American Chemical Society, Washington DC, USA, pp. 2-14.
34. Farre, M. J., Day, S., Neale, P. A., Stalter, D., Tang, J. Y. M. & Escher, B. I. 2013 Bioanalytical and chemical assessment of the disinfection byproduct formation potential: Role of organic matter. *Water Research* 47 (14), 5409-5421.
35. Van Dyke, M. I., Anderson, W. B., Huck, P. M. & Scott, D. B. 2015 Influence of water quality on nitrifier regrowth in two full-scale drinking

- water distribution systems. *Canadian Journal of Microbiology* 61 (12), 965-976.
36. Richards, C. L., Broadaway, S. C., Eggers, M. J., Pyle, B. H., Doyle, J., Camper, A. K. & Ford, T. E. 2018 Detection of pathogenic and non-pathogenic bacteria in drinking water and associated biofilms on the Crow Reservation, Montana, USA *Microbial Ecology* 76 (1), 52-63.
 37. Rodriguez-Martinez, S., Sharaby, Y., Pecellin, M., Brettar, I., Hofle, M. & Halpern, M. 2015 Spatial distribution of *Legionella pneumophila* MLVA-genotypes in a drinking water system. *Water Research* 77, 119-132.
 38. Duda, S., Baron, J. L., Wagener, M. M., Vidic, R. D. & Stout, J. E. 2015 Lack of correlation between *Legionella* colonization and microbial population quantification using heterotrophic plate count and adenosine triphosphate bioluminescence measurement. *Environmental Monitoring and Assessment* 187 (7), 393.
 39. Pierre, D., Baron, J. L., Ma, X., Sidari, F. P., Wagener, M. M. & Stout, J. E. 2019 Water quality as a predictor of *Legionella* positivity of building water systems. *Pathogens* 8 (4), 295. <https://doi.org/10.3390/pathogens8040295>.
 40. Sanchis, M., Inza, I. & Figueras, M. J. 2023 Heterotrophic plate count can predict the presence of *Legionella* spp. in cooling towers. *Pathogens* 12 (3), 466.
 41. Centers for Disease Control and Prevention 2018 What Owners and Managers of Buildings and Healthcare Facilities Need to Know About the Growth and Spread of *Legionella* Available from: <https://www.cdc.gov/legionella/wmp/overview/growth-and-spread.html>
 42. Edberg, S. C. & Allen, M. J. 2004 Virulence and risk from drinking water of heterotrophic plate count bacteria in human population groups. *International Journal of Food Microbiology* 92 (3), 255-263.
 43. Calderon, R. L. 1988 Bacteria Colonizing Point-of-Entry Granular Activated Carbon Filters and Their Relationship to Human Health. USEPA, Cincinnati, Ohio.
 44. Health Canada 2022 Guidance on Monitoring the Biological Stability of Drinking Water in Distribution Systems. Government of Canada — Health Canada, Ottawa
 45. Lautenschlager, K., Hwang, C., Liu, W. T., Boon, N., Koster, O., Vrouwenvelder, H., Egli, T. & Hammes, F. 2013 A microbiology-based multiparametric approach towards assessing biological stability in drinking water distribution networks. *Water Research* 47 (9), 3015-3025.
 46. Pavlov, D., De Wet, C. M. E., Grabow, W. O. K. & Ehlers, M. M. 2004 Potentially pathogenic features of heterotrophic plate count bacteria isolated from treated and untreated drinking water. *International Journal of Food Microbiology* 92 (3), 275-287.
 47. Stelma, G. N., Lye, D. J., Smith, B. G., Messer, J. W. & Payment, P. 2004 Rare occurrence of heterotrophic bacteria with pathogenic potential in potable water. *International Journal of Food Microbiology* 92 (3), 249-254.
 48. Carter, J. T., Rice, E. W., Buchberger, S. G. & Lee, Y. 2000 Relationships between levels of heterotrophic bacteria and water quality parameters in a drinking water distribution system. *Water Research* 34 (5), 1495-1502.
 49. Prest, E. I., Hammes, F., Kotzsch, S., van Loosdrecht, M. C. M. & Vrouwenvelder, J. S. 2013 Monitoring microbiological changes in drinking water systems using a fast and reproducible flow cytometric method. *Water Research* 47 (19), 7131-7142.
 50. Prest, E. I., El-Chakhtoura, J., Hammes, F., Saikaly, P. E., van Loosdrecht, M. C. M. & Vrouwenvelder, J. S. 2014 Combining flow cytometry and 16S rRNA gene pyrosequencing: A promising approach for drinking water monitoring and characterization. *Water Research* 63, 179-189.
 51. Chorley, B. N., Wehmas, L. C., Hester, S. D., Bennett, B., Chamberlin, J., Wood, C. E. & Carswell, G. 2018 Persistent DNA methylation after short-term exposure to dichloroacetic acid in mice. *Environmental and Molecular Mutagenesis* 59 (Supplement 1), 59.
 52. Pick, F. C., Fish, K. E., Biggs, C. A., Moses, J. P., Moore, G. & Boxall, J. B. 2019 Application of enhanced assimilable organic carbon method across operational drinking water systems. *PLoS ONE* 14 (12), e0225477.
 53. Gunnarsdottir, M. J., Gardarsson, S. M., Elliott, M., Sigmundsdottir, G. & Bartram, J. 2012 Benefits of water safety plans: Microbiology, compliance, and public health. *Environmental Science & Technology* 46 (14), 7782-7789.
 54. Prest, E. I., Hammes, F., van Loosdrecht, M. C. & Vrouwenvelder, J. S. 2016a Biological stability of drinking water: Controlling factors, methods, and challenges. *Frontiers in Microbiology* 7, 45.

Вперше надійшла до редакції 24.01.2025 p.
Рекомендована до друку на засіданні редакційної колегії після рецензування