

УДК 628.16:543.422:664

Екологія, іхтіологія та аквакультура

ОЦІНКА РІВНЯ МІГРАЦІЇ СВИНЦЮ З ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ У ПИТНУ ВОДУ МЕТОДОМ АТОМНО-АДСОРБЦІЙНОГО АНАЛІЗУ

Ямборак Р. С. — кандидат географічних наук,

доцент кафедри хімії

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

[orcid.org/ 0000-0003-1865-9308](https://orcid.org/0000-0003-1865-9308)

Крачан Т. М. — кандидат хімічних наук,

завідувач кафедри хімії

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

[orcid.org/ 0000-0002-0618-4483](https://orcid.org/0000-0002-0618-4483)

У статті висвітлено актуальну науково-практичну проблему забезпечення хімічної безпеки води, яка використовується як основна сировина та технологічний компонент на підприємствах харчової промисловості малого бізнесу, а також у закладах ресторанного господарства. Акцентовано увагу на тому, що традиційні системи контролю якості часто ігнорують ризики вторинного забруднення води важкими металами безпосередньо у внутрішніх розподільчих мережах («на останньому метрі»), де часто порушуються норми вибору конструкційних матеріалів.

Метою роботи є експериментальна оцінка впливу абіотичних факторів (інтенсивного ультрафіолетового випромінювання та високої температури навколишнього середовища) на кінетику міграції токсичних сполук свинцю з труб на основі неластифікованого полівінілхлориду (НПВХ) технічного призначення у питну воду.

Методологія. Дослідження проводилося із застосуванням інструментального методу полуменевої атомно-абсорбційної спектроскопії (ААС) у полум'ї ацетилен-повітря на аналітичній лінії 283,3 нм. Для нівелювання матричних впливів та переведення металів у розчинний стан використовувалася пробопідготовка методом кислотної мінералізації (HNO_3). Застосовано диференційну схему відбору проб, яка передбачала порівняльний аналіз води безпосередньо з артезіанської свердловини (контрольний зразок) та води, відібраної з кінцевої точки споживання після контакту з сірою ПВХ-трубою.

Результати. Експериментально підтверджено факт інтенсивної міграції іонів свинцю з полівінілхлоридних труб технічного призначення у питну воду. Лабораторний моніторинг зафіксував зростання концентрації свинцю з фонових значень ($< 0,005 \text{ мг/дм}^3$) до рівня $0,023 \text{ мг/дм}^3$. Встановлено перевищення гранично допустимої концентрації (ГДК), регламентованої ДСанПіН 2.2.4-171-10, у 2,3 рази в умовах літньої експлуатації зовнішнього водопроводу при стагнації води протягом 3 годин. Доведено, що основними факторами інтенсифікації забруднення є синергетична дія прямого сонячного випромінювання, що викликає фотодеструкцію («крейдування») поверхневого шару полімеру, та термічної екстракції термостабілізаторів у водне середовище.

Практичне значення. Показано, що стандартний екологічний моніторинг джерела водопостачання не відображає реальних ризиків для споживача харчової продукції, оскільки контамінація відбувається на етапі транспортування. Запропоновано комплекс заходів для удосконалення системи управління безпечністю харчових продуктів (НАССР), зокрема включення верифікації матеріалів інженерних мереж до програм-передумов (PRP) та впровадження обов'язкових протоколів промивання системи перед початком технологічного циклу.

Ключові слова: харчова безпека, питна вода, свинець, ААС, фотодеструкція ПВХ, НАССР, вторинне забруднення.

Yamborak R.S., Krachan T.M. Assessment of Lead Migration Levels from Polymer Pipes into Drinking Water via Atomic Absorption Analysis

The article addresses the urgent scientific and practical problem of ensuring the chemical safety of water used as a primary raw material and technological component in small-scale food industry enterprises and restaurant business establishments (HoReCa). It is emphasized that traditional quality control systems often overlook the risks of secondary water contamination with heavy metals directly within internal distribution networks ("the last meter"), where standards for the selection of construction materials are frequently violated.

The aim of the work is the experimental evaluation of the influence of abiotic factors (intense ultraviolet radiation and high ambient temperature) on the kinetics of toxic lead compound migration from technical-grade unplasticized polyvinyl chloride (PVC-U) pipes into drinking water.

Methodology. The study was conducted using the instrumental method of Flame Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) in an acetylene-air flame at the analytical line of 283.3 nm. To eliminate matrix effects and convert metals into a soluble state, sample preparation using acid mineralization (HNO_3) was employed. A differential sampling scheme was applied, which involved a comparative analysis of water directly from an artesian well (control sample) and water sampled from the final point of consumption after contact with a grey PVC pipe.

Results. The fact of intensive migration of lead ions from technical-grade polyvinyl chloride pipes into drinking water was experimentally confirmed. Laboratory monitoring recorded an increase in lead concentration from background values ($< 0.005 \text{ mg/dm}^3$) to a level of 0.023 mg/dm^3 . An excess of the Maximum Permissible Concentration (MPC), regulated by DSanPiN 2.2.4-171-10,

by 2.3 times was established under conditions of summer operation of an external water pipeline with water stagnation for 3 hours. It is proven that the main factors intensifying contamination are the synergistic effect of direct solar radiation, which causes photodegradation ("chalking") of the polymer surface layer, and thermal extraction of thermal stabilizers into the aqueous medium.

Practical value. It is demonstrated that standard environmental monitoring of the water supply source does not reflect real risks for the food consumer, as contamination occurs at the transportation stage. A set of measures for improving the Food Safety Management System (HACCP) is proposed, specifically the inclusion of engineering network material verification in Prerequisite Programs (PRPs) and the implementation of mandatory system flushing protocols before the start of the technological cycle.

Keywords: food safety, drinking water, lead contamination, AAS, PVC degradation, HACCP, secondary pollution.

Актуальність теми дослідження. Вода є одним із найважливіших стратегічних ресурсів у харчовій промисловості, виконуючи функції як технологічного середовища, так і основного рецептурного компонента. У виробництві напоїв, відновленні фруктових соків із концентратів, приготуванні сиропів, розсолів та маринадів вода складає від 80% до 99% маси готового продукту. Крім того, значні об'єми води використовуються для первинної обробки рослинної сировини (миття овочів, фруктів), бланшування, а також санітарної обробки обладнання. Враховуючи високу розчинну здатність води, її хімічний склад безпосередньо впливає на органолептичні показники, стійкість продукції при зберіганні та, насамперед, на її безпечність для споживача. Згідно з вимогами ДСанПіН 2.2.4-171-10 та європейського законодавства, вода, що використовується для технологічних потреб харчових підприємств, повинна відповідати стандартам на питну воду [1].

Постановка проблеми. Традиційний підхід до контролю якості води на підприємствах малого бізнесу та в закладах ресторанного господарства (HoReCa) часто обмежується моніторингом джерела водопостачання (свердловини або централізованої мережі). Однак, поза увагою залишається ризик вторинного забруднення води під час її транспортування внутрішніми комунікаціями [2]. Особливу загрозу становить використання у локальних водопроводах труб з непластифікованого полівінілхлориду (НПВХ) технічного призначення, які не мають гігієнічної сертифікації для контакту з харчовими продуктами. Відомо, що до складу таких полімерів можуть входити термостабілізатори на основі солей плюмбуму (Pb). Під дією абіотичних факторів — зокрема, ультрафіолетового випромінювання та температурних коливань — можлива деструкція полімерної матриці та міграція іонів важких металів у водне середовище [3, 4].

Методика досліджень. Метою роботи є дослідження ризиків міграції свинцю з несертифікованих полімерних труб у воду під дією сонячного випромінювання методом атомно-абсорбційної спектроскопії (ААС), а також обґрунтування необхідності включення моніторингу матеріалів водорозподільчих мереж як критичної точки контролю (КТК) або програми-передумови (PRP) в систему HACCP.

Матеріали та методи дослідження. Експериментальні дослідження проводилися на базі навчальної лабораторії кафедри хімії. Об'єктом дослідження була вода з підземного джерела (артезіанська свердловина глибиною 65 м), яка використовується для технологічних потреб харчового виробництва і повинна відповідати вимогам до питної води [1]. Подача води здійснювалася через зовнішній трубопровід довжиною 15 метрів. Як конструкційний матеріал досліджуваної ділянки трубопроводу використано труби з непластифікованого полівінілхлориду (НПВХ/PVC-U) діаметром 32 мм, сірого кольору, що класифікуються як технічні та не мають маркування

«для питної води». Трубопровід прокладено відкритим способом і він піддавався прямому впливу сонячної інсоляції.

Схема відбору проб. Для отримання репрезентативних даних застосовано метод порівняльного аналізу за принципом «до» і «після»: 1) Точка А (Контроль): Проба відбиралася безпосередньо на виході насосної станції, минаючи полімерну ділянку мережі. 2) Точка Б (Експеримент): Проба відбиралася з кінцевого крана-змішувача після проходження води через досліджувану ділянку труби. Відбір проводився в період пікового сонячного навантаження (14:00) після примусової стагнації води в системі протягом трьох годин. Температура навколишнього середовища становила +28°C, температура поверхні труби (виміряна пірометром) досягала +55°C.

Аналітична процедура. Відбір проб здійснювався у хімічно інертні поліетиленові ємності об'ємом 1,0 дм³. Для запобігання адсорбції іонів металів на стінках посуду та гідролізу проби негайно консервували додаванням концентрованої нітратної кислоти (HNO₃ кваліфікації «ос.ч.») до досягнення рН < 2. Визначення концентрації свинцю проводили методом полуменевої атомно-абсорбційної спектроскопії (ААС) із використанням лабораторного спектрофотометра, оснащеного системою електротермічного підпалу та лампою з порожнистим катодом [5].

Умови атомізації: Полум'я ацетилен-повітря (окиснювального типу); Аналітична лінія: Резонансна лінія свинцю 283,3 нм; Джерело випромінювання: Лампа з порожнистим катодом (ЛПК); Ширина спектральної щілини: 0,5 нм. Градування приладу виконували за серією стандартних розчинів, виготовлених на основі Державного стандартного зразка (ДСЗ) складу розчину іонів плюмбуму. Статистичну обробку результатів здійснювали шляхом розрахунку середнього арифметичного значення з трьох паралельних вимірювань (n=3, P=0,95).

Результати досліджень. Результати спектрального аналізу представлено в таблиці 1.

Аналіз отриманих даних свідчить про критичну різницю в показниках якості води. Відсутність свинцю в контрольній пробі підтверджує, що водоносний горизонт є чистим. Натомість, у пробі, що контактувала з нагрітою ПВХ-трубою, зафіксовано перевищення гранично допустимої концентрації у 2,3 рази.

Таблиця 1. Вміст свинцю (Pb) у досліджуваних зразках води

№ з/п	Характеристика проби	Умови відбору	Вміст Pb, мг/дм ³	ГДК [1]
1	Контроль (Свердловина)	Проточна холодна вода	< 0,005 (не виявлено)	0,01
2	Експеримент (Після труби)	Стагнація 3 год., нагрів на сонці	0,023	0,01

Механізм контамінації. Зафіксоване зростання концентрації свинцю до 0,023 мг/дм³ пояснюється комплексною дією абіотичних факторів на полімерну матрицю. НПВХ є термопластичним полімером, який за своєю природою є нестабільним до дії тепла та світла. Для запобігання його розкладанню при екструзії труб виробники додають термостабілізатори. У дешевих технічних трубах (сірого кольору) найчастіше використовуються сполуки плюмбуму (сульфати, стеарати) через їх низьку вартість та високу ефективність [7].

Аналіз механізму деструкції. Як свідчать узагальнені дані таблиці 2, першопричиною забруднення є поглинання енергії ультрафіолетового випромінювання хромофорними групами полімеру. Це ініціює автокаталітичну реакцію дегідрохлорування, що призводить до руйнування полімерної сітки на молекулярному рівні. Макроскопічним наслідком цього процесу є явище «крейдування» — утворення на поверхні труби крихкого шару, насиченого хлоридом плюмбуму (PbCl₂), який втратив зв'язок із полімерною матрицею [4]. Вирішальним фактором для безпеки споживача є етап екстракції. Висока температура води (внаслідок сонячного нагріву

труби) виступає кінетичним фактором, що експоненціально збільшує розчинність солей плюмбуму та швидкість їх дифузії у водне середовище [6]. Таким чином, поєднання фотодеструкції (руйнування бар'єру) та термічної екстракції (вимивання) створює умови для інтенсивного вторинного забруднення води. Деталізований механізм деструкції та міграції токсикантів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Механізм деструкції поверхневого шару НПВХ під дією абіотичних факторів

Етап процесу	Фактор впливу	Фізико-хімічні зміни	Наслідки для безпеки води
1. Фотоліз	УФ-випромінювання (Сонце)	Розрив зв'язків С-Сl, реакція дегідрохлорування (відщеплення HCl).	Руйнування полімерної матриці, втрата бар'єрних властивостей.
2. Окиснення	Кисень повітря (O ₂)	Утворення карбонільних груп, поява мікротріщин на поверхні.	Підвищення шорсткості поверхні труби.
3. «Крейдуння»	Комплексна дія	Міграція наповнювачів та пігментів на поверхню (білий наліт).	Вивільнення зв'язаних солей плюмбуму (PbCl ₂).
4. Екстракція	Температура води (>25° C)	Розчинення солей плюмбуму у воді.	Вторинне забруднення води свинцем.

Практичні рекомендації (Аспект НАССР). На основі отриманих даних розроблено рекомендації для інтеграції в системи управління безпечністю харчових продуктів (НАССР) для малих підприємств: Посилення вхідного контролю матеріалів (Інфраструктура). При оцінюванні ризиків на етапі створення програм-передумов (PRP) необхідно включити вимогу щодо верифікації матеріалів трубопроводів [7]. Забороняється використання труб із

НПВХ технічного призначення (маркування сірого кольору) у мережах питного водопостачання. Допускається використання лише сертифікованих труб (HDPE, PPR) із маркуванням «Питна вода». 2. Керування технологічним процесом (Протокол «Першого зливу»). Для об'єктів, де заміна комунікацій технічно неможлива, необхідно впровадити процедуру обов'язкового зливу води («flushing») після перерв у водозаборі. Злив води повинен здійснюватися до моменту стабілізації її температури на рівні температури джерела. 3. Періодична верифікація безпечності. Лабораторний моніторинг якості води (Pb, Cd) методом ААС рекомендовано проводити не рідше одного разу на рік [8]. Відбір проб повинен здійснюватися безпосередньо з «точки споживання» (виробничий кран), а не з джерела.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Експериментально підтверджено факт міграції іонів плюмбуму з неластифікованих полівінілхлоридних труб технічного призначення у питну воду. Встановлено, що в умовах літньої експлуатації зовнішнього водопроводу при стагнації води протягом 3 годин концентрація свинцю зростає з фонових значень ($<0,005$ мг/дм³) до 0,023 мг/дм³, що у 2,3 рази перевищує гранично допустиму концентрацію, встановлену ДСанПіН 2.2.4-171-10.

Доведено, що критичними факторами інтенсифікації хімічного забруднення є синергетична дія прямого ультрафіолетового випромінювання та високої температури. Ультрафіолет спричиняє фотодеструкцію поверхневого шару полімеру («крейдування»), а нагрів води прискорює дифузію вивільнених стабілізаторів.

Показано, що стандартний екологічний моніторинг джерела водопостачання не відображає реальних ризиків для безпечності харчової продукції, оскільки забруднення відбувається на етапі транспортування.

Обґрунтовано необхідність удосконалення системи НАССР для малих підприємств. Запропоновано включити верифікацію матеріалів

водопровідних мереж до програм-передумов (PRP) та впровадити обов'язкові протоколи промивання системи перед початком виробничого циклу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною : ДСанПіН 2.2.4-171-10 / Міністерство охорони здоров'я України. Київ, 2010. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10> (дата звернення: 10.01.2026).

2. Григоренко О. М., Петрук Р. В. Оцінка ризиків вторинного забруднення питної води в розподільчих мережах. Екологічна безпека та природокористування. 2021. № 4 (40). С. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.25-34>.

3. Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. incorporating the 1st and 2nd addenda / World Health Organization. Geneva : WHO, 2022. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064> (date of access: 10.01.2026).

4. Zhang Y., Liu X., Wang J. Release of lead and other heavy metals from polyvinyl chloride (PVC) pipes under UV irradiation and chlorination. Water Research. 2020. Vol. 186. Art. 116345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116345>.

5. Войціцький В. М., Хижняк С. В., Корнієнко В. І. та ін. Атомна спектрометрія – пріоритетний метод визначення важких металів у довкіллі та сільськогосподарській продукції. Екологічні науки. 2022. № 5 (44). С. 29–35. URL: <https://eco.j.dea.kiev.ua/archives/2022/5/4.pdf> (дата звернення: 10.01.2026).

6. Al-Naimi I. S., Al-Ghezi R. Impact of temperature and storage time on the migration of lead from uPVC pipes into drinking water. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1973. Art. 012154. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012154>.

7. Srivastava A., Singh P. Hazards of heavy metal migration from plastic food packaging and water distribution systems: A review. *Environmental Chemistry Letters*. 2023. Vol. 21. P. 1345–1367. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01508-6>.

8. Директива (ЕУ) 2020/2184 щодо якості води, призначеної для споживання людиною (перероблена) / Європейський Парламент та Рада Європейського Союзу. *Official Journal of the European Union*. 2020. L 435. P. 1–62. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj> (дата звернення: 10.01.2026).

References

1. Ministry of Health of Ukraine. Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption : DSanPiN 2.2.4-171-10. Kyiv, 2010. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10> (Last accessed: 10.01.2026).

2. Hryhorenko O. M., Petruk R. V. Risk assessment of secondary pollution of drinking water in distribution networks. *Ecological Safety and Nature Use*. 2021. № 4 (40). P. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.25-34> [in Ukrainian].

3. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. incorporating the 1st and 2nd addenda. Geneva : WHO, 2022. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064> (Last accessed: 10.01.2026).

4. Zhang Y., Liu X., Wang J. Release of lead and other heavy metals from polyvinyl chloride (PVC) pipes under UV irradiation and chlorination. *Water Research*. 2020. Vol. 186. Art. 116345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116345>.

5. Voitsitskyi V. M., Khyzhniak S. V., Korniienko V. I. et al. Atomic spectrometry – a priority method for determination of heavy metals in the environment and agricultural products. *Ecological Sciences*. 2022. № 5 (44). P.

29–35. URL: <https://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2022/5/4.pdf> (Last accessed: 10.01.2026) [in Ukrainian].

6. Al-Naimi I. S., Al-Ghezi R. Impact of temperature and storage time on the migration of lead from uPVC pipes into drinking water. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1973. Art. 012154. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012154>.

7. Srivastava A., Singh P. Hazards of heavy metal migration from plastic food packaging and water distribution systems: A review. *Environmental Chemistry Letters*. 2023. Vol. 21. P. 1345–1367. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01508-6>.

8. European Parliament and Council. Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption (recast). *Official Journal of the European Union*. 2020. L 435. P. 1–62. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj> (Last accessed: 10.01.2026).