

DOI: 10.61718/mon202512.03

Гайдучок Олександр Григорович

Кандидат технічних наук, доцент

ORCID: 0000-0003-3139-9061

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Кануннікова Надія Олександрівна

Доктор філософії

ORCID: 0000-0003-3611-6729

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Сакун Антоніна Олегівна

Доктор філософії, доцент

ORCID: 0000-0002-1079-7856

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Воробйов Богдан Віталійович

Доктор філософії

ORCID: 0000-0002-0264-354X

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Томашевський Роман Сергійович

Доктор технічних наук, професор

ORCID: 0000-0002-5278-9272

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Князева Ганна Олександрівна

Доктор філософії

ORCID: 0000-0002-5290-7566

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

5.3. Синергія технологічних рішень в автономному портативному пристрої очищення води як соціо-гуманітарний чинник водної безпеки

У роботі розглядається проблема забезпечення доступу населення до безпечної питної води в умовах воєнних дій, руйнування інженерної інфраструктури та зростання гуманітарних ризиків, що набуває ключового значення для соціальної стабільності та захисту життєдіяльності громад. Показано, що водопостачання в сучасних кризових умовах виходить за межі суто інженерного завдання і формується як соціо-гуманітарний чинник безпеки, здоров'я населення та стійкості територій. Проаналізовано історичні та сучасні особливості функціонування систем водопостачання України, рівень зношеності мереж, енергоємність технологічних процесів і наслідки воєнного впливу на якість водних ресурсів та надійність їх подачі. Особливу увагу приділено обґрунтуванню ролі автономних і портативних технічних рішень як інструментів зменшення соціальної вразливості населення в умовах порушення централізованого водозабезпечення. Представлено концепцію автономного портативного пристрою очищення води, засновану на синергії процесів фільтрації, озонування та ультрафіолетового знезараження, а також результати математичного моделювання й експериментальних досліджень його роботи. Доведено, що застосування мультибар'єрного підходу забезпечує ефективне знезараження води за низької питомої енергоємності, що створює передумови для використання пристрою в гуманітарних, надзвичайних і польових умовах. Отримані результати підтверджують соціо-гуманітарну доцільність впровадження автономних водоочисних систем як елементу підвищення водної безпеки населення та стійкості громад. Ключові слова: водна безпека; соціо-гуманітарна стійкість; автономний портативний пристрій; очищення води.

Вступ. Питання доступу до безпечної води в сучасних умовах набуває надзвичайної ваги, оскільки воно безпосередньо визначає якість життя населення та здатність суспільства протистояти масштабним соціальним і природним викликам. Вода сприймається не лише як матеріальний ресурс чи економічна категорія, а передусім як базова людська потреба, що закорінена у концепції гуманітарної безпеки. Немоżliвість гарантованого доступу до чистої питної води спричиняє зростання ризиків для здоров'я, посилює соціальну вразливість, ускладнює функціонування цивільних об'єктів та підриває стійкість громад. Саме тому гуманітарний аспект водозабезпечення стає ключовим у період глибоких трансформацій, які переживає Україна.

Безпечна вода виступає фундаментом життєздатності будь-якої громади, адже забезпечує можливість підтримувати санітарно-гігієнічні умови, здійснювати мінімальні господарсько-побутові процеси та зберігати соціальну активність. Водночас у воєнний період значення водних ресурсів та інфраструктури зростає в рази, оскільки вони опиняються серед перших об'єктів, що зазнають пошкоджень внаслідок обстрілів, диверсій або техногенних аварій. Руйнування водогонів, насосних станцій, станцій очищення води та свердловин створює загрозу масштабних гуманітарних криз, особливо в регіонах, де можливості для оперативного відновлення обмежені. Крім того, відсутність стабільного водопостачання унеможливує нормальну роботу медичних закладів, об'єктів критичної інфраструктури, систем пожежогасіння та служб цивільного захисту, що додатково посилює кризовий ефект.

Водогосподарський комплекс України демонструє поєднання історично сформованої централізованої структури управління із значним рівнем фізичного зношення інженерних мереж, енергетичною неефективністю технологічних процесів та обмеженою здатністю до адаптації під впливом зовнішніх кризових чинників. Такий стан справ обумовлює необхідність системного, міждисциплінарного аналізу функціонування систем водопостачання, який має враховувати взаємозалежність технічних, економічних, соціальних і екологічних компонентів їхньої стійкості. З огляду на сучасні виклики, пов'язані з воєнними діями, деградацією інфраструктури та кліматичними змінами, питання модернізації водопровідно-каналізаційного господарства набуває статусу стратегічного завдання державної політики у сфері національної безпеки та сталого розвитку.

Результати та обговорення. Питання організації централізованого водопостачання в українських містах почало набувати системного характеру наприкінці XIX – на початку XX століття, коли урбанізаційні процеси, промисловий розвиток і санітарно-епідемічні потреби зумовили потребу у впорядкованому водозабезпеченні населення. Вже у 1872 році в Києві запрацювала перша централізована водопровідна система, яка використовувала воду з Дніпра та мала механічну фільтрацію на піщаних фільтрах [1]. Подібні системи почали з'являтися у Львові, Одесі, Харкові, Катеринославі (нині Дніпро), що свідчило про формування технічної інфраструктури, характерної для європейських міст.

У промислову добу XX століття водопровідні мережі розвивалися паралельно з розширенням промислових підприємств і зростанням міського населення. Після Другої світової війни розпочалося масштабне будівництво водогонів та насосних станцій, що забезпечували централізоване постачання води для побутових, комунальних і виробничих потреб. Водночас акцент робився на кількісне розширення мереж, а не на їхню технологічну модернізацію. Саме в цей період сформувався технічний «каркас» сучасних водоканалів, який і сьогодні залишається основою системи, хоча більшість споруд перевищила нормативний термін експлуатації [2].

З 1991 році в Україні розпочалися глибокі структурні зміни, спрямовані на перехід до ринкових механізмів управління водними ресурсами та впровадження європейських підходів до стандартизації якості води. Прийнято Закон України «Про питну воду та питне водопостачання» (2002), який визначив правові та інституційні основи діяльності галузі, запроваджено національні стандарти якості води, узгоджені з Директивою 2000/60/ЕС Європейського Парламенту та Ради ЄС. У подальшому стратегічні документи, зокрема «Національна стратегія управління водними ресурсами України до 2030 року» (2022), орієнтувалися на зменшення втрат води, підвищення енергоефективності та створення інтегрованих систем управління.

У 1990-х роках галузь зіштовхнулася з кризою фінансування, моральним старінням обладнання та зростанням витрат на енергоносії. Більшість підприємств комунального водопостачання була передана у власність органів місцевого самоврядування, що посилювало фрагментацію управління і поглибило нерівномірність розвитку між регіонами [3]. Незважаючи на реформи децентралізації та спроби залучення інвестицій через програми Європейського інвестиційного банку (EIB) та NEFCO, технічний стан більшості водопровідних мереж залишається критичним: понад 40 % трубопроводів експлуатуються понад 30 років, а частка втрат води в деяких містах перевищує 35-40%.

Історичний розвиток систем централізованого водопостачання в Україні відбувався за моделлю, орієнтованою насамперед на масштабування та забезпечення зростаючих потреб урбанізованого населення і промислового сектору. Такий підхід був ефективним у період відносної стабільності, однак водночас сформував низку системних обмежень, які з часом трансформувалися у фактори інфраструктурної вразливості. Концепція централізації передбачала концентрацію водозаборів, очисних споруд, насосних станцій та магістральних мереж у єдиній технологічній системі, що забезпечувало економію ресурсів і керованість, проте знижувало гнучкість та адаптивність у кризових умовах.

Сформований у другій половині XX століття інженерний каркас водопровідно-каналізаційного господарства виявився інерційним щодо технологічних змін. Більшість елементів системи проєктувалася з розрахунком на стабільне енергопостачання, регулярне технічне обслуговування та централізоване управління,

що суттєво обмежує можливості їх функціонування в умовах воєнних дій, техногенних аварій або тривалих перебоїв електропостачання [4, 5]. Таким чином, історично закладена орієнтація на безперервність і масштабність стала одним із чинників, які у сучасних умовах зумовлюють зниження стійкості систем водопостачання.

Перехідний період після 1991 року супроводжувався інституційною трансформацією галузі, однак не призвів до системного оновлення технічної інфраструктури. Реформи були зосереджені переважно на зміні форм власності, тарифній політиці та адаптації нормативної бази, тоді як питання фізичного зношення мереж і модернізації обладнання залишалися другорядними через обмежені фінансові ресурси [3]. У результаті водопровідні системи вступили у XXI століття з накопиченим дефіцитом інвестицій, що зумовило їх високу чутливість до зовнішніх кризових впливів.

Важливою особливістю історично сформованих систем є їхня залежність від протяжних магістральних мереж, відмова або пошкодження яких призводить до масштабних порушень водопостачання на значних територіях. Така структурна особливість істотно ускладнює локалізацію аварій та швидке відновлення подачі води, особливо в умовах обмеженого доступу до ремонтних бригад і матеріально-технічних ресурсів. У кризових ситуаціях це перетворює централізовану систему з інструменту забезпечення стабільності на джерело додаткових ризиків для населення.

Важливою особливістю останнього десятиліття стало поєднання екологічних і технологічних пріоритетів із питаннями безпеки. Внаслідок військових дій після 2014 року частина систем водопостачання Донбасу, Луганщини, південних і східних регіонів зазнала прямих руйнувань. Це спонукало до розвитку концепцій автономних і резервних систем, що можуть функціонувати незалежно від централізованих мереж. Дослідження [4] показує, що модернізація водних систем потребує не лише технічного оновлення, але й перегляду моделей управління з урахуванням ризиків воєнного характеру та надзвичайних ситуацій.

Інфраструктура підземних та магістральних водопровідних мереж України в багатьох випадках експлуатується понад нормативні терміни без проведення системної заміни або капітального ремонту. Водночас така застарілість мереж призводить до підвищеної частоти аварій, проривів, витоків і, як наслідок, до зниження надійності водопостачання. У місті Житомирі, наприклад, було зафіксовано, що близько 36,5% водопровідних трубопроводів потребують заміни через аварійність або зношення, а мережі каналізації – 41,5% [5].

Особливо в умовах воєнного стану проблема зношення трубопроводів загострюється – руйнування насосних станцій, припинення експлуатації частини мереж і неможливість своєчасного ремонту створюють додаткову систему ризиків [6]. Таким чином, висока доля мереж із закінченим ресурсом експлуатації прямо впливає на стійкість систем водопостачання.

Водопостачальні системи України в значній мірі залежать від насосів для підйому, перекачки та транспортування води на великі відстані або висоти. Багато насосних станцій облаштовано застарілим обладнанням, яке має низьку енергоефективність та обмежені можливості автоматизації. Наприклад, проєкт [7], реалізований за підтримки NEFCO, включав часткову реконструкцію насосних станцій і заміну застарілого обладнання на енергоефективні моделі з автоматизованим керуванням, що дозволяє зменшити енергоспоживання і підвищити надійність.

Дані заходи є реакцією на системні виклики: високі витрати електроенергії на експлуатацію водоканалів, що підвищують тарифне навантаження на споживачів, обмежують можливості підприємств інвестувати у модернізацію та знижують їх фінансову стійкість. В умовах нестабільного енергопостачання та військового тиску ефективність насосного обладнання стає критичним фактором стійкості водопостачальних систем.

За результатами звітів громадських ініціатив встановлено, що в окремих українських водоканалах втрати води становлять від 30 до 50% від загального об'єму поданої споживачам води [8]. Такий рівень втрат істотно впливає на ефективність роботи підприємств, підвищує собівартість послуг, а також створює додаткові ризики для екологічної рівноваги та соціальної стабільності. У період збройного конфлікту стан водопровідних систем погіршується ще більше. За даними UNICEF [9], унаслідок воєнних дій пошкоджено або зруйновано понад 39 700 км мереж водопостачання, що призвело до суттєвого зростання обсягів втрат води та зниження рівня доступу населення до безпечних джерел. В умовах активних бойових дій та періодичних перебоїв енергопостачання мережі водопостачання часто функціонують у надзвичайному режимі, що зумовлює додаткові втрати води, зменшення тиску та збільшення кількості аварійних ділянок. Сукупність цих факторів спричиняє поступову функціональну деградацію інфраструктури та посилює її залежність від зовнішніх кризових впливів.

Взаємозв'язок зношеності, енергоемності і втрат води формує критичну матрицю ризиків для системи централізованого водопостачання. Низький технологічний рівень обладнання підвищує потребу в енергії, що, в свою чергу, підсилює фінансове навантаження і зменшує можливості для капітальних інвестицій. Одночасно

високі втрати води означають, що значна частина ресурсів витрачається даремно, що знижує продуктивність водопостачання і підвищує вартість одиниці доставленої води. У ситуації воєнного конфлікту ці проблеми набувають нового виміру: пошкодження інфраструктури, порушення енергопостачання, логістичні обмеження і нестача реагентів – усе це в сумі створює складну кризову ситуацію, в якій централізовані мережі втрачають свою гнучкість і надійність.

Поєднання фізичного зношення інженерних мереж, високої енергоємності технологічних процесів та значних втрат води формує багаторівневу систему ризиків, яка визначає функціональну нестійкість централізованого водопостачання. На відміну від локальних технічних несправностей, такі ризики мають кумулятивний характер і проявляються не ізольовано, а у вигляді послідовного ланцюга негативних наслідків, що охоплюють технічну, економічну та соціальну сфери.

Первинним елементом цього ланцюга виступає деградація трубопроводних мереж і насосного обладнання, яка зумовлює зростання аварійності та неконтрольованих витоків води. Підвищені втрати призводять до необхідності збільшення обсягів забору та перекачування води, що, у свою чергу, підвищує енергоспоживання системи. Зростання енерговитрат негативно впливає на фінансову стабільність підприємств водопостачання, обмежує можливості інвестування у модернізацію та прискорює подальше фізичне старіння інфраструктури. Таким чином формується замкнене коло, у якому технічні та економічні чинники взаємно підсилюють один одного [9].

Важливою особливістю централізованих систем є їх висока структурна зв'язаність, за якої порушення роботи окремих елементів спричиняє каскадні ефекти на значних територіях. Аварія на магістральному трубопроводі або насосній станції не лише призводить до локального припинення подачі води, але й порушує гідравлічні режими в суміжних ділянках мережі, знижує тиск, погіршує якість води та ускладнює забезпечення споживачів нормативними обсягами ресурсу [7]. За таких умов система втрачає здатність до локалізації відмов і переходить у режим підвищеної вразливості.

З техніко-технологічної точки зору деградація мереж супроводжується погіршенням якості води в процесі транспортування [10]. Корозійні продукти, вторинне забруднення, підсмоктування ґрунтових вод у місцях розгерметизації та порушення режимів незараження створюють додаткові ризики для санітарної безпеки. Навіть за умов відповідності якості води на виході з очисних споруд, стан мереж може зумовлювати відхилення показників на етапі подачі кінцевому споживачу, що ускладнює контроль і підвищує ймовірність мікробіологічного забруднення.

Соціально-економічний вимір ризиків проявляється у зростанні тарифного навантаження, зниженні доступності послуг та посиленні соціальної напруги. Перебої у водопостачанні та погіршення якості води змушують населення використовувати альтернативні джерела, що підвищує витрати домогосподарств і формує нерівність у доступі до безпечного ресурсу. У цьому контексті технічна нестійкість системи трансформується у гуманітарний ризик, що впливає на стан здоров'я, санітарні умови та загальну стійкість громад [5].

Деградація централізованих систем водопостачання має комплексний характер і не може бути розглянута виключно як інженерна проблема. Вона формується на перетині технічних, енергетичних, економічних та соціальних чинників і створює передумови для системних збоїв у кризових умовах. Усвідомлення цієї багатовимірності є необхідною передумовою для обґрунтування альтернативних і доповнювальних підходів до забезпечення водної безпеки, зокрема шляхом розвитку автономних і децентралізованих рішень, здатних зменшувати масштаб негативних наслідків при порушенні роботи централізованої інфраструктури.

Окрім технічних і технологічних чинників, стійкість систем централізованого водопостачання значною мірою визначається інституційними умовами їх функціонування та соціально-територіальними особливостями регіонів. Процеси децентралізації управління, що відбуваються в Україні, формально розширили повноваження органів місцевого самоврядування у сфері експлуатації комунальної інфраструктури, однак на практиці не завжди супроводжувалися адекватним нарощуванням управлінських, фінансових і технічних спроможностей на місцях.

У багатьох територіальних громадах управління системами водопостачання здійснюється в умовах дефіциту кваліфікованих кадрів, обмеженого доступу до спеціалізованої інженерної експертизи та недостатньої матеріально-технічної бази, що ускладнює впровадження сучасних підходів до моніторингу стану мереж, прогнозування аварійних ситуацій та планування довгострокових програм модернізації. У результаті управлінські рішення часто мають реактивний характер і спрямовані на ліквідацію наслідків аварій, а не на зменшення системних ризиків [4].

Соціально-територіальна неоднорідність країни додатково посилює вразливість централізованих систем. Великі міста, як правило, мають кращий доступ до фінансових ресурсів і зовнішньої підтримки, тоді як малі міста та сільські громади змушені експлуатувати інфраструктуру з високим ступенем зношеності за умов

обмежених бюджетів. Така асиметрія формує нерівність у доступі до безпечної питної води та підвищує чутливість окремих територій до кризових впливів, включно з техногенними аваріями та воєнними загрозами.

В умовах воєнного стану інституційні обмеження набувають особливої гостроти. Порушення логістичних ланцюгів, нестабільність енергопостачання та обмежений доступ до ремонтних матеріалів значно ускладнюють виконання базових функцій підприємств водопостачання. Місцеві органи влади нерідко опиняються в ситуації, коли відповідальність за забезпечення населення водою не підкріплюється достатніми ресурсами для швидкого реагування на надзвичайні обставини, що підсилює залежність громад від зовнішньої допомоги та тимчасових рішень гуманітарного характеру [2].

Соціальний вимір проблеми проявляється у зростанні водної бідності, погіршенні санітарно-гігієнічних умов та підвищенні рівня соціальної напруги. Перебої у водопостачанні найбільш гостро відчуваються вразливими групами населення – літніми людьми, особами з інвалідністю, внутрішньо переміщеними особами та мешканцями сільських територій. За відсутності стабільного доступу до безпечної води зростає ризик захворюваності, поглиблюється нерівність та ускладнюється процес соціальної адаптації в умовах тривалих криз.

Воєнні дії спричинили суттєве порушення інженерної та технологічної цілісності систем централізованого водопостачання. Різні форми вогневого впливу, перебої енергопостачання, ускладнення логістики та обмежений доступ до ремонтних матеріалів призвели до різкого зниження експлуатаційної надійності інфраструктури. Аналітичні оцінки міжнародних організацій підтверджують масштабність руйнувань. У дослідженні, підготовленому за участі Світового банку та Європейської комісії, визначено, що протягом перших двох років війни сукупні збитки у секторі водопостачання, водовідведення та управління водними ресурсами досягли приблизно чотирьох мільярдів доларів США, тоді як потреба у відновленні оцінюється на рівні близько одинадцяти мільярдів [11].

Структурний аналіз пошкоджень засвідчує значну деградацію трубопроводних мереж, насосних станцій та споруд очищення. За даними Київської школи економіки зафіксовано руйнування понад тисячі дев'ятисот кілометрів водопроводів та двадцяти п'яти установок з очищення води. Також відзначено втрату працездатності значної частини насосних агрегатів, що забезпечували підтримання тиску в міських мережах [12]. Дослідження профільних комунальних підприємств додатково свідчать про суттєве порушення функціонування магістральних трубопроводів у великих містах. На прикладі Харкова показано, що повторні обстріли призвели до пошкодження артерій водопостачання, колекторних ліній та елементів розподільчої інфраструктури, що спричинило періодичне припинення подачі води для значної частини населення [13].

Інженерні та технологічні процеси зазнали також значного вторинного впливу через тривалі перерви в електропостачанні. У таких умовах зупиняється насосне обладнання, порушуються режимні параметри роботи споруд очищення, збільшується кількість аварійних станів у трубопроводах та фіксується дефіцит реагентів для проведення технологічних операцій. За інформацією UNICEF пошкодження водних мереж охопили понад тридцять дев'ять тисяч кілометрів систем транспортування води, що підтверджує масштабність інфраструктурних втрат та пов'язаних з ними перебоїв у водопостачанні [14]. Немоżliвість своєчасного доступу ремонтних бригад до пошкоджених ділянок спричиняє накопичення дефектів та зростання частоти аварій. У результаті формується стан довготривалої структурної вразливості, у якому системи централізованого водопостачання не здатні забезпечувати стабільні показники якості та надійності.

Процес децентралізації, що став одним із ключових напрямів реформування системи публічного управління в Україні, суттєво змінив архітектуру управління комунальною інфраструктурою, включно з об'єктами централізованого водопостачання. Передавання значної частини повноважень і відповідальності від центральних органів влади до органів місцевого самоврядування відкрило можливості для більш гнучкого реагування на локальні потреби, однак водночас висвітлило низку системних обмежень.

Науковий аналіз механізмів багаторівневого врядування, представлений у дослідженні [15], демонструє, що процеси децентралізації не завжди супроводжуються належним нарощуванням управлінських спроможностей на місцевому рівні. Наголошується, що значна частина громад має недостатній кадровий потенціал, обмежене експертне забезпечення та нерозвинуті інституційні механізми, які необхідні для прийняття технічно обґрунтованих рішень щодо функціонування критичної інфраструктури, зокрема водопровідно-каналізаційного господарства. Така ситуація створює ризик фрагментації стратегічного планування та ускладнює реалізацію комплексних інфраструктурних проєктів.

Дослідження, присвячені організації водопостачання у період збройного конфлікту, також підтверджують наявність системних проблем. У [4] зазначено, що локальні системи водопостачання демонструють високу вразливість до зовнішніх впливів за умов воєнних дій, оскільки місцеві громади часто оперують застарілими мережами, дефіцитним бюджетом та обмеженим доступом до технологічного

обладнання. У період активних бойових дій громади нерідко опиняються перед необхідністю підтримувати роботу водоканалів в умовах нестабільного енергопостачання та значних пошкоджень лінійної інфраструктури, що істотно перевищує їх фінансові та організаційні ресурси.

Особливе значення має вплив фінансової спроможності громад на їхню здатність забезпечувати модернізацію та безперервне функціонування систем водопостачання. Децентралізація формально розширила фінансову автономію місцевого самоврядування, однак фактичні можливості інвестування в оновлення мережі значною мірою залежать від локальної економічної бази та демографічної ситуації. Значна частина невеликих громад не має достатніх доходів, щоб забезпечувати заміну трубопроводів, модернізацію насосних станцій або впровадження енергоефективних технологій, що створює асиметрію у доступі до якісної водної інфраструктури між відносно багатшими та економічно слабшими громадами [6].

У контексті воєнних дій система децентралізованого управління водоканалами перебуває під додатковим тиском. Руйнування магістральних мереж, обстріли насосних станцій та відсутність стабільних ланцюгів постачання матеріалів для ремонту формують ситуацію, у якій місцеві органи влади вимушені вирішувати завдання, що перевищують їх технічні та організаційні можливості. Відсутність централізованих механізмів швидкої допомоги у комбінованих кризових умовах, притаманних воєнному часу, поглиблює системні дисбаланси та ускладнює підтримання належного рівня водопостачальних послуг.

Інтенсивні бойові дії на сході та півдні України спричинили масштабне погіршення технічного стану систем централізованого водопостачання. Найбільш суттєві порушення зафіксовані у Донецькій, Луганській, Херсонській та частково Харківській областях, де руйнування магістральних водогонів, насосних станцій та об'єктів водопідготовки набули системного характеру. У цих регіонах водогінна інфраструктура зазнала прямого ураження під час обстрілів, що призвело до зупинки подачі води на значних територіях та до втрати функціональної цілісності окремих ділянок міжобласних систем [1].

Одним із ключових чинників ризиків стала руйнація логістичних маршрутів, необхідних для стабільного забезпечення реагентами для знезараження та освітлення води (Рис.1). Постачання гіпохлориту натрію, коагулянтів на основі алюмінію або заліза та засобів коригування рН у багатьох випадках стало нестабільним через блокування транспортних комунікацій, пошкодження складів та обмеження доступу до виробничих майданчиків. Порушення логістики призвело до періодичного дефіциту реагентів, що унеможливило дотримання нормативів щодо мікробіологічної та хімічної безпеки питної води.



Рис. 1. Вплив воєнних дій на технічні, економічні та соціальні компоненти деградації систем водопостачання

Суттєвим обмеженням стало ускладнення аварійно-відновлювальних робіт. Дефіцит електроенергії та руйнування ліній електропередач зупиняли насосні агрегати, знижували тиск у мережах і спричиняли масове накопичення повітря у трубопроводах. Відсутність запасних частин та обладнання для ремонту унеможливлювала швидке відновлення пошкоджених ділянок. Служби водоканалів працювали у режимі постійного ризику, оскільки виконання ремонтів у зоні ураження вимагало координації з військовими підрозділами та було пов'язане з загрозою повторних обстрілів.

За таких умов громади впроваджували тимчасові рішення для забезпечення мінімального доступу населення до питної води. Найпоширенішими формами стали мобільні пункти видачі води, автоцистерни, резервуари швидкого встановлення та постачання бутильованої води гуманітарними організаціями. Міжнародні структури встановлювали пересувні станції очищення з використанням мембранних технологій, ультрафіолетового знезараження та гіперхлорування. Такі рішення забезпечували короткострокову стабілізацію водопостачання, проте не компенсували втрати функціональності централізованих систем.

Соціально-економічні наслідки вразливості водної інфраструктури проявилися у підвищенні тарифів, зростанні вартості альтернативних джерел води та зниженні доступності ресурсу для різних груп населення. Погіршення якості життя та збільшення тривалості перебоїв у водопостачанні стали каталізаторами внутрішньої міграції та зміни демографічної структури постраждалих громад. У довгостроковій перспективі це формує ризики посилення соціальної нерівності та ускладнює відновлення економічної активності у регіонах, де водна інфраструктура була критично пошкоджена.

Гідрологічний режим водних об'єктів України зазнав суттєвих змін. Порушення структури водного балансу спостерігається у басейнах Дніпра, Південного Бугу та Сіверського Дінця. Підриви гідротехнічних споруд і локальні затоплення спричинили зміну швидкісних характеристик течії, перерозподіл донних наносів та зростання каламутності води. Додатковим чинником стало скорочення об'ємів весняного стоку через зменшення кількості опадів і підвищення середньорічної температури, що посилює дефіцит водних ресурсів у південних регіонах.

Хімічна контамінація джерел водопостачання зросла внаслідок надходження нітратів, важких металів та нафтопродуктів [14-16]. У басейні Дніпра встановлено підвищення концентрацій сполук азоту, які надходять із пошкоджених каналізаційних об'єктів та підтоплених полігонів відходів.

В акваторії Інгульця спостерігається збільшення вмісту марганцю, заліза та продуктів корозії трубопроводів. У Сіверському Дінці зафіксовано надходження нафтопродуктів та фенолів унаслідок руйнування промислових майданчиків та обстрілів об'єктів енергетичної інфраструктури. Такі зміни супроводжуються перевищенням гранично допустимих концентрацій у контрольних створах та погіршенням якості води, призначеної для централізованого та децентралізованого водопостачання [13].

Мікробіологічні ризики зросли через втрату санітарних охоронних зон та порушення роботи систем водовідведення. Руйнування захисних споруд і зупинка очисних станцій сприяють проникненню патогенних мікроорганізмів у водозабори. У низці громад зафіксовано підвищений вміст кишкової палички, ентерококів та сульфівідновлювальних клостридій. Порушення гідрогеологічних бар'єрів та підтоплення територій збільшують імовірність дифузного надходження мікробних забруднень у поверхневі й підземні водоносні горизонти.

Стан водних ресурсів ускладнюється зростанням вмісту мікропластику. Джерелами його потрапляння стали руйнування полімерних матеріалів на територіях бойових дій, фрагментація ізоляційних покриттів та інтенсивне використання одноразової пластикової тари. Мікропластик виявляється у поверхневих та підземних водах, що формує додатковий ризик для систем водопідготовки, оскільки частина частинок проходить через традиційні фільтраційні бар'єри. Дослідження НАН України засвідчують зростання концентрації мікропластиків у водоймах, розташованих у зонах інтенсивних бойових дій, у 1,7-2,3 раза відносно довоєнного періоду [5].

Сільські водозабори та колодязі продемонстрували найбільшу вразливість. За даними моніторингу МОЗ та Державної екологічної інспекції у частині громад південних та східних регіонів фіксується перевищення вмісту нітратів у 1,5–3 рази порівняно з нормативами. У підземних водах малих глибин зростає концентрація аміаку, заліза та бактеріальних індикаторів унаслідок зміни напрямків підземного стоку, руйнування вигрібних ям та техногенного навантаження. Зниження природної здатності ґрунтів до самоочищення у зонах тривалого підтоплення посилює деградацію джерел децентралізованого водопостачання та потребує створення альтернативних систем очищення [7].

Соціально-територіальна диференціація доступу до безпечної води в Україні формується під впливом поєднання інфраструктурних, економічних та демографічних чинників. Міста з розвиненими системами централізованого водопостачання мають вищу стабільність подачі та кращі можливості контролю якості. Сільські громади характеризуються фрагментарною інфраструктурою, залежністю від локальних свердловин і колодязів та обмеженим доступом до лабораторного моніторингу. У таких громадах частота перевищень вмісту нітратів і мікробних індикаторів є вищою, що поглиблює нерівність у рівні водної безпеки.

У домогосподарствах без централізованого водопостачання рівень доступності залежить від природних характеристик водоносних горизонтів, відстані до альтернативних джерел та здатності домогосподарств інвестувати у фільтраційні та знезаражувальні системи.

Феномен водної бідності формується у домогосподарств з низьким рівнем доходів, коли витрати на питну та технічну воду перевищують три п'ятих від загального бюджету. Така ситуація виникає у громадах, де централізоване водопостачання працює нестабільно і населення змушене купувати бутильовану воду або замовляти доставку. Водна бідність знижує можливості домогосподарств підтримувати належні санітарні умови і підвищує ризики захворюваності [9].

Доступ до води залежить також від соціального статусу, віку та фізичних можливостей. Особи похилого віку та люди з інвалідністю стикаються з обмеженнями мобільності, що ускладнює доступ до пунктів видачі привізної води. Жінки у сільських громадах частіше виконують функції забезпечення домогосподарства водою, що збільшує їхнє навантаження у разі дефіциту ресурсу. Вікова структура населення визначає чутливість до мікробіологічної та хімічної якості води, оскільки діти є більш вразливою групою щодо нітратного забруднення та патогенних мікроорганізмів.

Обмежений доступ до води формує осередки соціальної напруги. У громадах фіксуються локальні конфлікти, пов'язані з пріоритетністю підключення до тимчасових систем, черговістю отримання привізної води та використанням свердловин спільного користування. У відповідь виникають громадські ініціативи, спрямовані на колективне буріння свердловин, облаштування пунктів очищення та створення систем локального моніторингу. Такі ініціативи частково компенсують нерівність, однак не усувають її структурних причин.

Руйнування водогосподарських систем суттєво впливає на економіку регіонів. Аграрний сектор зазнає втрат через нестабільність зрошення та забруднення води, що знижує урожайність і обмежує можливості переробної промисловості. Промислові підприємства стикаються з ризиками зупинки виробництва через неможливість забезпечення технологічних потреб у воді необхідної якості. Житлово-комунальна сфера несе додаткові витрати на аварійне відновлення, закупівлю привізної води та забезпечення мінімальних санітарних стандартів. У сукупності такі фактори формують значне економічне навантаження на території, які постраждали від руйнування інфраструктури, і уповільнюють їхнє відновлення.

Державна політика у сфері водопостачання ґрунтується на довгострокових стратегічних документах, які визначають напрями модернізації інфраструктури, гармонізації нормативної бази та впровадження екологічних стандартів. Стратегія управління водними ресурсами України до 2050 року передбачає оновлення гідротехнічних споруд, підвищення енергоефективності водопровідних систем, розбудову систем моніторингу та адаптацію до змін клімату. План дій з інтеграції у Водну рамкову директиву Європейського Союзу орієнтований на поступове впровадження принципів басейнового менеджменту, досягнення доброго екологічного стану вод та уніфікацію підходів до оцінки ризиків для питного водопостачання. Виконання цих документів формує основу для структурної трансформації водогосподарського комплексу та його стійкості у кризових умовах [12].

Міжнародні організації здійснюють суттєвий внесок у забезпечення доступу до безпечної води, особливо у регіонах, що постраждали від бойових дій. UNICEF підтримує створення пунктів видачі води, розгортання мобільних очисних станцій та відновлення критичних елементів інфраструктури. WHO забезпечує експертний супровід щодо контролю якості води та розроблення санітарних протоколів для громад у зоні ризику. USAID реалізує програми модернізації водопровідних мереж, підтримки водоканалів та зміцнення їх фінансової стійкості. Ініціатива EU4Environment зосереджується на оновленні екологічних стандартів та інтеграції української водної політики у європейський регуляторний простір. Спільним результатом діяльності міжнародних партнерів є зменшення вразливості населення та створення передумов для відновлення локальних систем водопостачання.

Гуманітарні місії відіграють ключову роль у забезпеченні населення водою у надзвичайних умовах. Їхня діяльність включає розгортання мобільних станцій очищення з мембранною фільтрацією, ультрафіолетовим знезараженням та системами дозування хлору. Комплекси забезпечують стабільну подачу води у громадах, де інфраструктура зруйнована або функціонує нестабільно. Мобільність і швидкість розгортання дозволяють підтримувати життєзабезпечення населення до моменту відновлення централізованих мереж [3, 7].

Економічна стабільність систем водопостачання в Україні визначається співвідношенням фактичних витрат на очищення, транспортування та енергозабезпечення з рівнем тарифів, встановлених для домогосподарств і підприємств. Собівартість виробництва однієї тисячі кубічних метрів води формується витратами на реагенти, електроенергію, амортизацію обладнання, ремонтно-експлуатаційні роботи та лабораторний контроль. У багатьох громадах зношеність насосного обладнання та трубопроводів підвищує питомі енерговитрати, що збільшує розрив між фактичною собівартістю і тарифом, затвердженим регулятором [2].

Централізовані системи у малих громадах демонструють низьку економічну ефективність через обмежений обсяг споживання. Фіксовані витрати на утримання мереж та насосних станцій розподіляються на невелику кількість абонентів, що робить тариф економічно необґрунтованим для населення і фінансово

недостатнім для оператора. У деяких громадах обсяги споживання зменшуються через депопуляцію, що додатково погіршує економічні показники та прискорює деградацію локальних систем [8].

Локальні автономні системи водопостачання в умовах кризових навантажень демонструють вищу економічну ефективність та потребують менших витрат на транспортування, оскільки вода очищається безпосередньо в місці споживання. експлуатаційні витрати знижуються за рахунок використання енергоощадних технологій, наприклад мембранної фільтрації та модульних станцій, які мають невисоку амортизаційну складову і можуть швидко розгортатися у зонах зруйнованої інфраструктури. Автономність зменшує залежність від централізованої енергомережі та забезпечує високу гнучкість під час гуманітарних криз.

Розвиток автономних компактних систем очищення води має не лише технологічний чи інженерний вимір, а насамперед гуманітарний, оскільки доступ до чистої та безпечної води є фундаментальним правом людини, закріпленим у міжнародних конвенціях, стратегіях сталого розвитку та рекомендаціях глобальних організацій. У кризових регіонах України, що постраждали від бойових дій, порушення цього права стало масовим явищем: постійні обстріли, пошкодження водогонів, руйнування насосних станцій, забруднення поверхневих джерел і тривалі відключення електроенергії поставили значну частину населення перед прямою загрозою втрати доступу до питної води. У таких умовах компактні установки очищення води стають не лише інженерними рішеннями, а засобами гуманітарної підтримки, що дозволяють гарантувати мінімально необхідний рівень життєзабезпечення, стабільність побуту та зниження рівня вразливості соціальних груп.

У регіонах, де централізована інфраструктура зруйнована або працює нестабільно, автономні системи дозволяють подолати критичний розрив між потребами людей та можливостями держави чи гуманітарних місій. Їх використання особливо важливе для дітей, літніх людей, осіб з інвалідністю та внутрішньо переміщених осіб, які найбільше страждають від обмежень у доступі до чистої води. Своєчасне забезпечення таких груп безпечною водою є елементом превентивної гуманітарної політики, що дозволяє скорочувати рівень стресу, панічних станів і загроз для здоров'я.

Вода з відкритих джерел нерідко містить патогенні мікроорганізми, включно з кишковою паличкою, ентерококами, сальмонелами, вірусами та спороутворюючими бактеріями. У такій ситуації значно зростає небезпека спалахів шлунково-кишкових інфекцій, гепатиту А, дизентерії та інших хвороб, що легко поширюються за умов скученого проживання або обмеженого доступу до медичної допомоги. Використання компактних систем, оснащених фільтраційними, озонними та ультрафіолетовими модулями, дозволяє ефективно знижувати мікробіологічне навантаження, унеможливити повторне інфікування та забезпечувати відповідність води гігієнічним нормам. Таким чином, компактні установки виступають інструментом епідеміологічної безпеки, що здатен зменшити ризики захворюваності навіть у надзвичайно складних умовах.

Психосоціальний аспект також є ключовим у контексті гуманітарної ефективності. Втрата доступу до води призводить до тривалого стану невизначеності, занепокоєння й відчуття небезпеки. Люди змушені витратити значні ресурси на пошук альтернативних джерел, стояти у чергах за привозною водою, долати труднощі логістики. Пристрої, які здатні працювати автономно та виробляти необхідний добовий об'єм питної води, формують відчуття стабільності й контролю над власною ситуацією, що позитивно впливає на психологічний стан громад та зменшує рівень соціальної напруги. Особливо важливо це в умовах тривалого стресу, де навіть невеликі елементи нормальності – доступна чиста вода, можливість приготувати їжу, забезпечити дітей – стають ключовими чинниками підтримки морального стану.

Існуючі індивідуальні засоби очищення, зокрема портативні фільтри трубчастого або глечикового типу, характеризуються обмеженням ресурсом роботи, низькою продуктивністю та поступовим зниженням ефективності знезараження внаслідок деградації сорбентів і замулювання фільтрувальних елементів. Це істотно обмежує можливість їх використання для тривалого забезпечення водою груп споживачів.

Більш технологічно досконалі системи, зокрема установки зворотного осмосу, забезпечують високий ступінь очищення, однак потребують значного вхідного тиску та мають низький коефіцієнт виходу очищеної води. В умовах автономної експлуатації це призводить до неприйнятно високих енергетичних витрат і втрат водного ресурсу, що особливо критично за дефіциту джерел води.

Тому, під час розробки компактного автономного пристрою була прийнята ідея, що фізико-хімічні та біологічні процеси, які відбуваються у сучасних системах очищення води, потребують інтеграції кількох незалежних, але синергійно взаємодіючих методів. Найбільш ефективними є фільтраційні процеси, окиснення озомом та ультрафіолетове знезараження, які разом формують мультибар'єрний підхід до очищення.

На першому етапі механічної фільтрації важливо забезпечити ефективне вилучення завислих часток, колоїдів, залишків ґрунту, корозійних фрагментів трубопроводів та органічних мікрочастинок, які потрапляють у воду під час транспортних або бойових пошкоджень. Проведені нами дослідження [17] показують, що використання фільтрів із багатошарових тканинних матеріалів – бавовняних, синтетичних або комбінованих – може суттєво підвищити якість очищення, оскільки такі матеріали утворюють складну пористу структуру, яка здатна затримувати частинки різного розміру. Особливого значення набуває ефект самоутворення фільтраційного шару, при якому затримані частинки формують вторинну плівку, що додатково посилює

очищення без збільшення енерговитрат. Експериментальне моделювання з використанням суспензій SiC різної фракції підтвердили, що при концентраціях понад 7 г/л створюється стабільна плівка, що дозволяє затримувати частинки, у кілька разів менші за пори фільтра. Такий принцип особливо цінний для компактних установок, оскільки дозволяє мінімізувати частоту заміни картриджів і зменшити загальний гідравлічний опір.

Другим етапом очищення є озонування, яке виконує функцію потужного окиснення органічних і неорганічних сполук. Озон руйнує клітинні стінки бактерій, знищує віруси, окислює ароматичні структури, розкладає нафтопродукти, нейтралізує неприємні запахи та суттєво знижує хімічну потребу в кисні. У компактних системах озонування особливо важливо забезпечити мінімальне енергоспоживання, використовуючи генератори коронного розряду з низькою потужністю. Однак озонування має певні обмеження: воно не забезпечує повного знезараження, особливо щодо стійких форм бактерій, і часто потребує додаткової фізичної обробки води.

Саме тому критично важливим є третій етап – ультрафіолетове (УФ) обробка води в діапазоні 260-270 нм, де відбувається максимально ефективно поглинання випромінювання нуклеїновими кислотами.

Окрему групу складають системи фізико-хімічного знезараження на основі озонування та ультрафіолетового опромінення. Кожен із цих методів є ефективним для вирішення окремих задач водопідготовки, проте їх застосування у відокремленому вигляді не забезпечує комплексного очищення води з поверхневих або техногенних джерел. Стаціонарні установки комбінованої дії, що поєднують фільтрацію, озонування та УФ-знезараження, здатні забезпечити повний цикл підготовки питної води, однак відрізняються значними габаритами та високим енергоспоживанням, що унеможливило їх портативне застосування.

У зв'язку з цим перспективним є підхід, заснований на поетапній циклічній обробці води в компактній автономній системі. Запропонована нами конструктивно-технологічна схема (рис. 2) [18] передбачає розділення процесу водопідготовки на два функціональні контури: первинний контур подачі та накопичення води і вторинний циркуляційний контур очищення та знезараження. Така організація процесу дозволяє зменшити пікові навантаження на насосне обладнання та оптимізувати енергоспоживання системи в цілому.

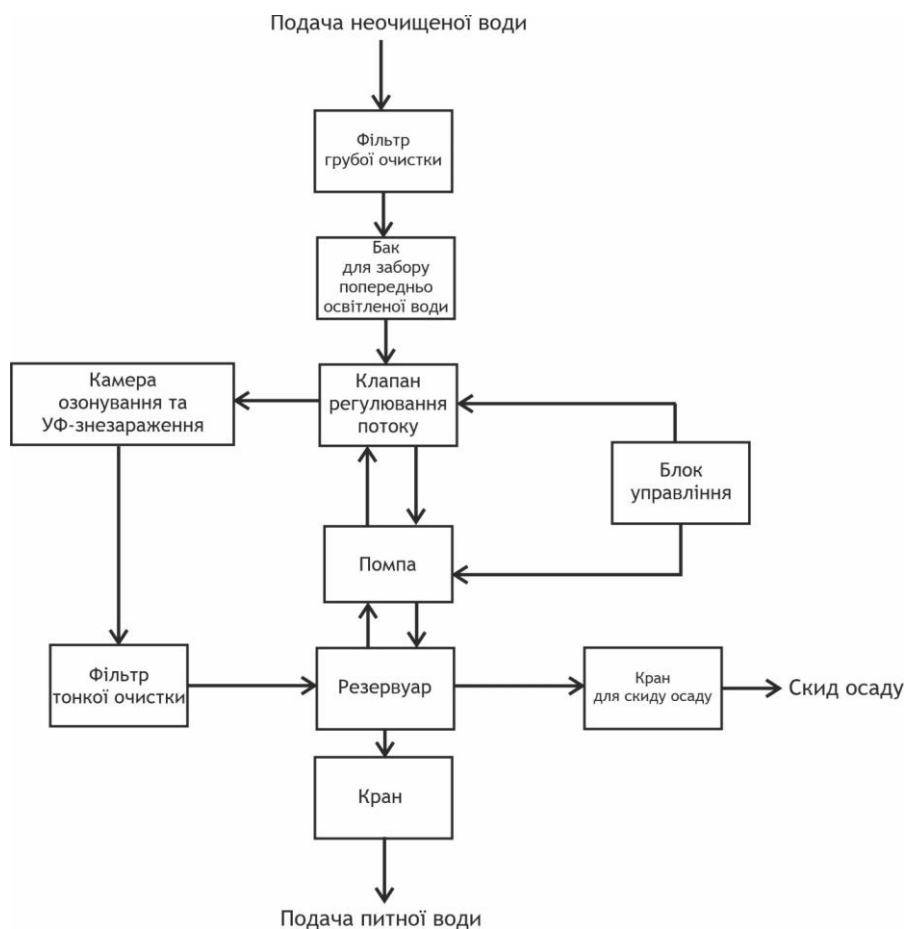


Рис 2. Конструктивно-технологічна схема очищення води в автономному портативному пристрої

Вода, що надходить із зовнішнього джерела, попередньо проходить стадію механічного очищення з видаленням завислих домішок і акумулюється в резервуарі первинного зберігання. Подальша обробка здійснюється шляхом багаторазової циркуляції води через блок комплексного впливу, де послідовно реалізуються процеси озонування та ультрафіолетового знезараження, а також тонкого фільтрування. Озон використовується в помірних концентраціях для окиснення розчинених металів, руйнування органічних забруднювачів і попереднього інактивування патогенних мікроорганізмів, які надалі видаляються фільтром тонкого очищення.

Кінцеву стадію знезараження забезпечує УФ в діапазоні коротких хвиль, що гарантує інактивацію бактерій, вірусів і найпростіших. Застосування УФ-діодів як джерела випромінювання дозволяє суттєво знизити енергоспоживання, підвищити надійність та екологічну безпеку системи порівняно з традиційними люмінесцентними лампами.

Циклічний характер обробки дає змогу досягти необхідного рівня якості води без використання високих доз реагентів або інтенсивних режимів опромінення. Це, у свою чергу, сприяє зменшенню матеріалоемності, габаритних розмірів та енергетичних витрат установки, а також створює передумови для її живлення від малопотужних автономних джерел, зокрема сонячних панелей.

Нами була створена конструкція автономного портативного пристрою (рис. 3), який складається з двох основних елементів: ємності для води 1 та фільтруючої частини 2, які поєднуються між собою гнучкими роз'ємними трубками. Ємність для води має об'єм 10 літрів, з'єднує бокову частину 3 з краном 4 для обслуговування резервуару. Всі з'єднання зроблені загерметизовані прокладкою 5 із харчового силікону. Ємність кріпиться до фільтруючої частини швидкознімними скобами 6 для зручності експлуатації.

Фільтруюча частина має складну конструкцію і включає наступні елементи: камера для мембранного фільтруючого елемента 7, озонуючу камеру 8, де розміщено озонатор 9, блок живлення 10, акумуляторну батарею 11, з'ємне віконце для швидкої заміни фільтруючого елемента 12, УФ-діоди для знезараження 13 та систему управління 14.

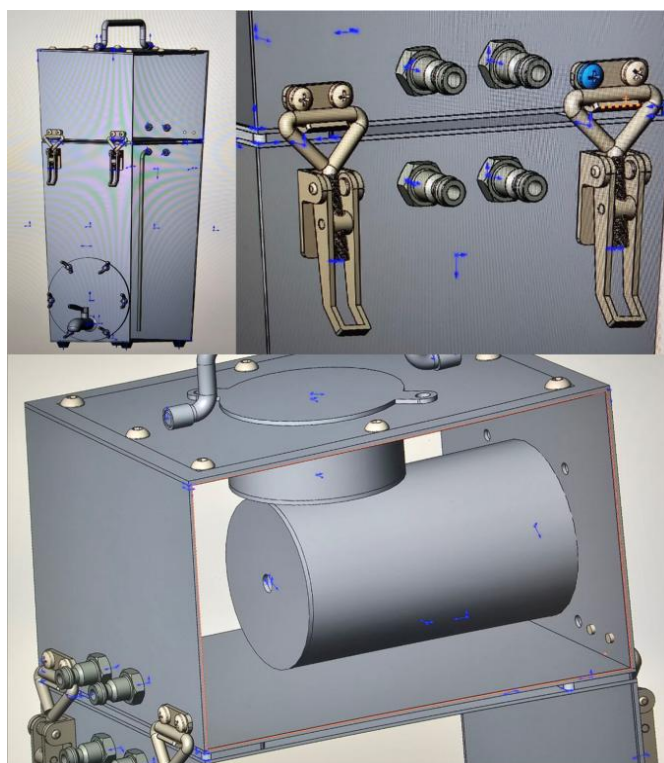


Рис 3. 3D вигляд запропонованої конструкції автономного портативного пристрою

Розташування елементів виконане таким чином, щоб займати якомога менший об'єм і при цьому забезпечити швидкість і зручність обслуговування. Корпуси вироблені з харчової нержавіючої сталі з дотримання всіх вимог проєктування (рис 4).

Робота насосного вузла в запропонованому пристрої описується як аперіодичний динамічний процес із сталою часу порядку 0,1 с, що відповідає умовам перекачування рідкого середовища з відносно стабільними гідравлічними параметрами. Навантаженням для помпи виступає водний потік, гідравлічний опір якого формується насамперед мембранним фільтрувальним елементом. Фільтр має циліндричну геометрію з діаметром близько 60 мм, при цьому фільтрація здійснюється за схемою внутрішнього всмоктування, що сприяє рівномірному розподілу потоку через фільтрувальну поверхню та зменшенню локальних гідравлічних втрат.



Рис 4. Фактична реалізація конструкції пристрою

Підвідні трубопроводи помпи виконані з внутрішнім діаметром близько 10 мм, що забезпечує компроміс між компактністю конструкції та допустимими швидкостями руху води. Теплові процеси в насосному вузлі характеризуються сталою часу нагрівання порядку 65 с, а зміна електричного опору обмоток у процесі роботи враховується коефіцієнтом температурної корекції, який становить приблизно 1,24.

У процесі дослідження фільтрації на першому етапі очищення води математичне моделювання стало підґрунтям для формування режиму роботи фільтрувального елемента. На основі розробленої математичної моделі трьохступеневого фільтрувального елемента [19], що описує послідовне проходження потоку крізь волокнистий шар, зернисте завантаження та металеву сітку, було обґрунтовано параметри режиму фільтрування для видалення завислих речовин з урахуванням фізичної природи кожного пористого середовища. Така конструкція забезпечує поетапне затримання часток різної крупності та формування комплексного фільтраційного ефекту при русі води від зовнішньої поверхні фільтра до його центральної частини.

Математична модель дала змогу кількісно описати зміну гідравлічних втрат і концентрації завислих речовин у воді в часі та вздовж товщини фільтрувального елемента з урахуванням накопичення осаду, розвитку кольматації пор і можливих змін ефективної площі фільтрації. Отримані залежності стали основою для вибору допустимих швидкостей фільтрування, граничних перепадів тиску та тривалості фільтраційного циклу, що визначають експлуатаційний режим першого ступеня очищення.

На підставі результатів моделювання встановлено характер руху рідини крізь фільтр, що дозволило прийняти ламінарний режим течії в усіх шарах фільтрувального елемента. Це забезпечило коректне врахування домінування конвективного перенесення завислих речовин над дифузійним, лінійний характер кінетики зміни концентрації домішок у пористих середовищах та можливість використання спрощених залежностей для опису гідродинаміки та масообміну без втрати адекватності моделі.

Сформований на основі математичної моделі режим фільтрування враховує відмінності механізмів затримання часток у зернистому завантаженні та в пористих перегородках. Для зернистого шару режим роботи орієнтований на об'ємне затримання домішок із поступовою кольматацією пор, тоді як для волокнистого шару та металевої сітки передбачено контроль умов формування поверхневого осаду або локального блокування пор залежно від гранулометричного складу зависі. Такий підхід забезпечує раціональний розподіл фільтраційного навантаження між ступенями та зменшує швидкість наростання сумарних втрат напору.

Отримані модельні залежності використано для встановлення умов експлуатації фільтра за сталого перепаду тиску або в складі насосної системи з заданою гідравлічною характеристикою. Це дозволило сформувати режим фільтрування, адаптований до змінної якості вихідної води, за якого забезпечується стабільність роботи фільтрувального елемента та прогнозоване досягнення граничних параметрів фільтраційного циклу.

Це забезпечує перехід від теоретичного опису процесів фільтрування до практично реалізованого режиму роботи фільтра, орієнтованого на підвищення ефективності очищення та експлуатаційної надійності системи в цілому. Сформований режим першого етапу очищення визначає гідродинамічні умови подальших стадій обробки води, зокрема процесів окиснення та знезараження, що реалізуються в озонуючому блоці установки.

Узгоджені з режимом фільтрування параметри роботи системи озонування забезпечують її стабільне функціонування в межах заданих електричних і гідродинамічних характеристик. Система озонування включає озонуючий модуль та допоміжний вузол подачі повітря для барботажу, сумарне електричне навантаження яких формується, з одного боку, озонуючим елементом потужністю близько 18 Вт, а з іншого – повітряною помпою барботажу з енергоспоживанням на рівні приблизно 2 Вт. Озонуючий елемент виконано у вигляді двопластинної електродної системи, що живиться від підвищувального трансформатора, параметри якого визначають динаміку електричних процесів у колі та характер генерації озону.

Електрична стала часу первинної обмотки трансформатора становить близько 0,16 с, що забезпечує стабілізацію режиму озонування та зменшує вплив короточасних коливань навантаження. Повітряна помпа барботажу характеризується меншою електричною сталою часу, на рівні близько 0,07 с, завдяки чому система швидко реагує на зміни експлуатаційних режимів і підтримує сталу інтенсивність барботажу впродовж процесу очищення води. Така узгодженість електричних та гідродинамічних характеристик фільтраційного й озонуючого блоків забезпечує їх сумісну роботу в єдиному технологічному режимі та сприяє підвищенню загальної ефективності системи водопідготовки.

Ультрафіолетове знезараження реалізується за допомогою напівпровідникових джерел випромінювання UVC-діапазону типорозміру 3535 з номінальною споживаною потужністю близько 300 мВт. Електричні характеристики таких світлодіодів відповідають типовій вольт-амперній залежності для UVC-напівпровідникових структур. Максимальна корисна потужність ультрафіолетового випромінювання становить до 15 мВт, що є достатнім для забезпечення бактерицидного ефекту за умов багаторазової циркуляції води в замкненому контурі обробки.

Під час розробки запропонованого автономного портативного пристрою для очищення води були проведені дослідження щодо впливу УФ-діодів на якість очищення води і тривалість обробки води.

На підставі отриманих експериментальних даних виконано комплексний аналіз впливу УФ-випромінювання на якість води з урахуванням тривалості експозиції, інтенсивності опромінення, матеріалу ємності та гідродинамічних умов, що в сукупності визначають кінцеву ефективність дезінфекції. Дослідження проводилися протягом другої половини 2024 року – у липні, листопаді та грудні – із застосуванням різних конфігурацій експериментальної установки, включно зі скляними та пластиковими ємностями, лампами різних виробників, у тому числі Philips, а також із варіацією часу опромінення від 2 до 20 хвилин. Параметром оцінки ефективності виступало зниження концентрації колонієутворювальних одиниць (КУО) у воді, визначене бактеріологічним методом до та після впливу УФ. Це дозволило кількісно охарактеризувати ступінь дезінфекції та встановити закономірності, що визначають оптимальні режими роботи системи (табл. 1).

Перші експерименти були спрямовані на перевірку впливу скляної оболонки на результативність УФ-обробки. Вода знаходилася в ємності зі склом, що частково поглинає короткохвильову частину спектра. Початкова концентрація мікроорганізмів становила 790 КУО/см³. Після 2 хвилин опромінення концентрація зменшилася до 720 КУО/см³, а через 5 хвилин – до 630 КУО/см³. Максимальне зниження, досягнуте після 10 хвилин, склало 44,3%. Отже, навіть при десятихвилинному впливі зберігалася понад половина життєздатних клітин, що свідчить про суттєве поглинання ультрафіолету склом. Таке явище підтверджує відому проблему екранування UV-C хвиль (254 нм) силікатним склом, через що в подальших серіях від нього відмовилися. Цей результат визначив критичну вимогу: матеріал корпусу має бути кварцовим або полімерним із високою прозорістю до бактерицидного спектра.

Подальші досліді проводилися без скляного екрана, що дозволило оцінити «чистий» вплив УФ-випромінювання. Початкова концентрація становила 2000 КУО/см³, і вже через 5 хвилин вона зменшилася до 690 КУО/см³ (ефективність 65,5%), а через 10 хвилин – до 510 КУО/см³ (74,5%). Найвищий ефект, 84%, зафіксовано після 20 хвилин опромінення, коли кількість життєздатних клітин становила лише 320 КУО/см³.

Таблиця 1

Експериментальні дані щодо впливу часу УФ-обробки на концентрацію мікроорганізмів

Найменування	Концентрація колонієутворювальних одиниць в КУО/см ³ при різному часі (хв) УФ-випромінюванні				
	0	2	5	10	20
15 липня 2024 р.					
Діодна УФ лампа через скло	790	720	630	440	
11 листопада 2024 р.					
Діодна УФ лампа без скла	2000	1900	690	510	320
29 листопада 2024 р.					
Діодна УФ лампа без скла	24000	6100	6400	4800	6900
УФ-лампа Philips	2400	3200	-	-	-
Діодна УФ лампа	2400	6400	-	-	-

Результати демонструють типовий експоненціальний характер зниження КУО зі зростанням тривалості впливу, що узгоджується з моделлю кінетики першого порядку. Особливо помітно, що перші 5 хвилин дають різке падіння чисельності мікроорганізмів, після чого крива ефективності виходить на плато, тобто подальше збільшення часу не дає пропорційного приросту результату. Цей ефект пояснюється зменшенням густини мікробного навантаження і, відповідно, меншою ймовірністю поглинання квантів УФ клітинами.

Третя серія дослідів відзначалася значно більшим вихідним рівнем бактеріального забруднення – близько 24 000 КУО/см³. Такі концентрації дозволяють дослідити граничні можливості УФ-методу при надмірному мікробному навантаженні. Вже через 2 хвилини інтенсивного опромінення концентрація знизилася до 6100 КУО/см³ (ефективність 74,6%), що є високим показником для такої короткої експозиції.

Надалі ефективність змінювалася нерівномірно: на 5 хвилині вона складала 73,3%, на 10 хвилині зростала до 80%, а після 20 хвилин зменшувалася до 71,3%. Такі коливання пояснюються гідродинамічними факторами – утворенням тіньових зон і неоднорідним розподілом інтенсивності в об'ємі води. Крім того, у зразках із надвисоким бактеріальним навантаженням спостерігається явище рекомбінації чи повторного росту частково інактивованих клітин, що може тимчасово підвищувати видимі значення КУО. Порівняння двох типів світлодіодних ламп – стандартної УФ і виробника Philips – показало, що при однаковій тривалості обробки остання забезпечує глибшу дезінфекцію: після двох циклів інтенсивного опромінення Philips ефективність досягла 86,7%, тоді як звичайна лампа дала 73,3 %. Таким чином, технологічно доцільним є використання або потужніших джерел випромінювання, або системи двоетапної обробки з рециркуляцією води.

Показовими є результати експериментів, спрямованих на оцінювання впливу перемішування на ефективність процесу (табл. 2).

Початкова концентрація мікроорганізмів становила 1600 КУО/см³. У спокійному стані після 3 хвилин концентрація знизилася до 840 КУО/см³ (ефективність 47,5%), а після 6 хвилин – до 580 КУО/см³ (63,8%). При перемішуванні показники були вищими: через 3 хвилини – 580 КУО/см³ (63,8%), а через 6 хвилин – 460 КУО/см³ (71,3%). Очевидно, що рух води покращує рівномірність опромінення, зменшує утворення тіньових зон і забезпечує контакт усіх часток із полем випромінювання. Водночас при надмірному перемішуванні можливе зворотне явище – ресуспендування осаджених часток, які можуть містити ще живі клітини, що призводить до тимчасового підвищення кількості КУО у пробах. Це підтверджено експериментом з діодом Philips: у спокійному стані за 6 хвилин ефективність становила 85,6%, тоді як при активному перемішуванні вона знизилася до 46,3 %. Таким чином, оптимальний режим передбачає м'яке перемішування або ламінарну рециркуляцію без турбулентності, що дозволяє мінімізувати тіньові зони без повторного підняття осаду.

Таблиця 2

Оцінка впливу гідродинамічних умов (перемішування) на результати обробки води

Найменування	Концентрація колонієутворювальних одиниць в КУО/см ³ при різному часі (хв) УФ-випромінюванні		
	0	3	6
Звичайний УФ-діод (спокійний стан)	1600	840	580
Звичайний УФ-діод (після перемішування)	1600	580	460
УФ-діод Філіпс (спокійний стан)	1600	960	230
УФ-діод Філіпс (після перемішування)	1600	560	860

З отриманих результатів випливають ключові закономірності, що визначають оптимальні параметри УФ-дезінфекції води. По-перше, матеріал корпусу та прозорість до бактерицидного спектра критично впливають на результат. Будь-яке скляне покриття або оптична перешкода знижує ефективність удвічі й більше, тому необхідно застосовувати кварц чи УФ-прозорі полімери. По-друге, тривалість впливу визначає досягнення цільового рівня знезараження: при середньому початковому мікробному числі 10^3 - 10^4 КУО/см³ оптимальним є інтервал 5-10 хвилин, що забезпечує 70-85% інактивації; подовження часу понад 20 хвилин економічно недоцільне через слабе зростання ефекту. По-третє, при високих початкових концентраціях доцільно застосовувати каскадні або двоетапні системи, у яких перша лампа знижує основну масу мікроорганізмів, а друга – добирає залишкову фракцію, досягаючи стабільних 85-90% інактивації. По-четверте, гідродинамічний режим суттєво впливає на розподіл дози: ламінарне або помірне перемішування забезпечує вирівнювання освітлення і підвищує ефективність на 10-15% у порівнянні зі спокійною водою, проте інтенсивна турбулентність може спричинити зворотний ефект.

У межах виконаного дослідження енергетична складова функціонування запропонованої схеми очищення в автономному портативному пристрої була визначена як один із ключових критеріїв оцінювання її ефективності. У ході експериментів встановлено реальні значення споживання електроенергії основними вузлами установки та їхній внесок у загальний енергетичний баланс. Це дозволило обґрунтувати енергетично доцільні режими озонування та ультрафіолетового знезараження в межах єдиного технологічного циклу.

Дослідження проводилося для лабораторної установки із замкненим контуром обробки води об'ємом 10 л, де повний цикл тривав 30 хв і складався з двох послідовних режимів. На першому етапі, тривалістю 10 хв, здійснювалося наповнення резервуара через мембранний фільтр із паралельною роботою насосного обладнання та УФ-модуля. На другому етапі, тривалістю 20 хв, реалізовувалися циркуляція та барботажа води, при цьому озонування тривало сумарно 10 хв, а УФ-знезараження здійснювалося безперервно протягом усього циклу.

Вимірювання показали, що середні витрати електроенергії за один повний цикл становлять близько 8,5 Вт·год. Із цієї величини приблизно 4,0 Вт·год припадає на роботу насосного обладнання, близько 1,0 Вт·год – на УФ-модуль, та орієнтовно 3,5 Вт·год – на озонатор. Таким чином, частка озонування у загальному енергетичному балансі складає близько 40-45%, що підтверджує доцільність оптимізації саме цього етапу процесу. При цьому максимальне миттєве електричне навантаження в режимі одночасної роботи циркуляційної помпи, УФ-лампи та озонатора досягало близько 29 Вт з урахуванням перехідних процесів.

Аналіз кінетики накопичення розчиненого озону показав, що досягнення цільових показників знезараження доцільно оцінювати через СТ-критерій, який є інтегралом концентрації озону за час контакту. Для умов досліджуваної води з помірним органічним навантаженням цільові значення СТ знаходилися в межах 1-3 мг·хв/л, при цьому практичним орієнтиром було значення близько 2,0 мг·хв/л. Експериментально встановлено, що за середньої концентрації розчиненого озону на рівні 0,2-0,5 мг/л досягнення такого СТ можливе вже за 8-10 хв активного дозування.

Порівняння різних режимів подачі озону показало, що безперервна робота озонатора протягом 10 хв забезпечує необхідний СТ, але не є оптимальною з енергетичної точки зору. Перехід до імпульсного режиму з п'ятьма циклами по 2 хв подачі озону з паузами по 2 хв дозволив отримати аналогічні або вищі значення СТ за меншого сумарного часу активної роботи озонатора. У результаті сумарне енергоспоживання озонатора зменшувалося з приблизно 3,5 Вт·год до 2,8-3,0 Вт·год за цикл, що відповідало економії близько 15-20% без погіршення якості обробки води.

Додатковий внесок у зниження енергоспоживання забезпечувала безперервна ультрафіолетова обробка, яка за енерговитрат близько 1,0 Вт·год за цикл створювала синергетичний ефект з озонуванням. Завдяки цьому необхідний СТ-критерій досягався за менших доз озону, а залишкова концентрація розчиненого озону на виході утримувалася на рівні не вище 0,1 мг/л, що відповідає вимогам безпеки та не погіршує органолептичні показники води.

Узагальнення результатів показало, що оптимізований режим роботи установки дозволяє знизити загальні витрати електроенергії за цикл з 8,5 Вт·год до приблизно 7,8 Вт·год, тобто на 8-10%, без зміни конструктивної схеми та збереження високого рівня знезараження. Отримані числові значення підтверджують, що енергетична ефективність системи водоочищення визначається насамперед раціональним керуванням режимами озонування та їх узгодженням з іншими технологічними етапами, що є принципово важливим для автономних, мобільних і резервних систем водопідготовки.

Проведені підготовчі та польові дослідження були спрямовані на комплексну верифікацію ефективності запропонованого пристрою в реальних умовах експлуатації. Основним завданням випробувань було підтвердження стабільності досягнення мікробіологічних і фізико-хімічних показників якості води для різних типів вихідних матриць за одночасної оцінки енергетичної доцільності повного технологічного циклу. Прототип було реалізовано у вигляді двоконтурної системи, що поєднує напірний та замкнений рециркуляційний контури і включає два резервуари, триходовий керуючий клапан, циркуляційну помпу, модуль озонування з барботажем та блок ультрафіолетового знезараження на основі УФ-світлодіодів. Така архітектура була свідомо обрана для забезпечення автономності, портативності та зниженого енергоспоживання без використання дорогих витратних матеріалів.

Функціонування прототипу здійснювалося за стандартним 30-хвилинним циклом, який включав етап первинного наповнення та фільтрації води з подальшим переходом до замкненого режиму рециркуляції з одночасним озонуванням і безперервним ультрафіолетовим опроміненням. Середні значення енергоспоживання, отримані за результатами серійних повторів, свідчать про формування сумарних витрат електроенергії на рівні близько 8,5 Вт·год на цикл при об'ємі оброблюваної води 10 л, що відповідає питомій енергії приблизно 0,85 Вт·год/л. Пікові миттєві навантаження не перевищували розрахункових значень і підтвердили можливість живлення системи від малопотужних автономних джерел.

Для оцінки ефективності роботи прототипу було сформовано матрицю вод різної якості, що охоплювала зразки з низькою, помірною та підвищеною каламутністю й органічним навантаженням, характерні для підземних, поверхневих і акумульованих міських джерел. Для кожного класу води виконувалися багаторазові повні цикли обробки з відбором проб на вході та виході системи, що дозволило проаналізувати повторюваність результатів і стійкість процесів до коливань вихідних параметрів. У випадках складних матриць з підвищеним мікробіологічним фоном додатково застосовувався двоцикловий режим обробки.

Мікробіологічна ефективність визначалася шляхом порівняння початкової та залишкової мікробної обсемененості за стандартними культуральними методами з подальшим розрахунком логарифмічної редукції. Фізико-хімічний контроль включав вимірювання каламутності, водневого показника, окисно-відновного потенціалу та, за необхідності, показників органічного забруднення. Особливу увагу приділяли контролю залишкового озону на виході циклу та оцінці інтегрального параметра СТ, що характеризує сумарний вплив озонування в часі. Для інтерпретації внеску ультрафіолетового знезараження використовувалася розрахункова доза опромінення, визначена як добуток опроміненості в робочій зоні та тривалості експозиції протягом усього циклу.

На етапі лабораторних випробувань було оптимізовано режими дозування озону шляхом порівняння безперервного та імпульсних сценаріїв подачі. Отримані результати показали доцільність використання багатократного короткоімпульсного дозування, яке забезпечує інтенсифікацію масопереносу та досягнення необхідного інтегрального СТ за меншого сумарного часу роботи озонатора. Це дозволило скоротити енергоспоживання модуля озонування без погіршення мікробіологічних показників очищення.

Польові випробування підтвердили стабільність енергетичного профілю системи та її ефективність для всіх досліджених класів води. Для матриць з низькою та помірною каламутністю одноцикловий режим забезпечував суттєве зниження мікробіологічних показників, у ряді випадків до межі чутливості методів аналізу. Для складніших вод з високим органічним навантаженням двоцикловий режим дозволяв досягти додаткової логарифмічної редукції при лінійному зростанні сумарних енергетичних витрат. Фізико-хімічні показники води після обробки відповідали безпечним значенням, а функціонування систем керування та захисту підтвердило експлуатаційну надійність прототипу.

Отримані результати свідчать про наявність вираженої синергії між процесами фільтрації, озонування, ультрафіолетового опромінення та багаторазової рециркуляції. Попереднє озонування сприяє зниженню органічного навантаження та підвищує ефективність УФ-знезараження, тоді як безперервна циркуляція забезпечує кратність проходів води через зону обробки та мінімізує вплив локальних гідродинамічних неоднорідностей.

Окремої уваги заслуговує питання енергозабезпечення прототипу, оскільки саме можливість роботи від альтернативних і автономних джерел живлення суттєво розширює сферу його практичного застосування. Низька питома енергоємність повного циклу обробки води створює передумови для використання широкого спектра джерел електроенергії, включно з централізованими мережами змінного струму, акумуляторними системами, мобільними генераторами та відновлюваними джерелами малої потужності.

У разі стаціонарної експлуатації в умовах наявності електромережі прототип може працювати від стандартних побутових або промислових джерел живлення з використанням імпульсних блоків перетворення напруги. При цьому відсутність пікових перевантажень, що перевищують розрахункові значення, мінімізує вимоги до якості електроживлення та дозволяє експлуатувати систему навіть у мережах із нестабільними параметрами, що характерно для сільських або віддалених населених пунктів.

В умовах автономної роботи особливо перспективним є використання акумуляторних батарей, зокрема літій-іонних або літій-залізо-фосфатних систем, які забезпечують оптимальне співвідношення енергоємності, маси та ресурсу циклів заряд-розряд. Зафіксовані значення питомої енергії циклу дозволяють реалізувати багаторазову обробку води без підзарядки навіть при використанні компактних акумуляторних модулів, що є критично важливим для польових умов, мобільних пунктів водопідготовки або тимчасових поселень.

Окрема перспективність полягає в інтеграції автономного портативного пристрою з відновлюваними джерелами енергії малої потужності, насамперед сонячними фотомодулями. Енергетичний профіль системи, що характеризується відносно низькою середньою потужністю та короткочасними піками навантаження, добре узгоджується з можливостями сонячних панелей у поєднанні з буферними акумуляторами. Це відкриває можливість створення повністю автономних водоочисних модулів, здатних функціонувати без зовнішнього електропостачання протягом світлового дня або з використанням накопиченої енергії в нічний час.

У надзвичайних ситуаціях або за умов тривалого знеструмлення перспективним є живлення системи від мобільних бензинових чи дизельних генераторів малої потужності. Завдяки низьким енергетичним потребам прототипу зменшується витрата палива на одиницю обробленої води, що підвищує загальну ефективність таких рішень у кризових сценаріях. Крім того, конструктивна модульність системи допускає використання гібридних схем живлення, у яких генератор застосовується лише для підзарядки акумуляторів, а безпосередня робота циклів обробки здійснюється від накопиченої електроенергії.

Компактні автономні системи очищення води характеризуються високою екологічною ефективністю, що проявляється насамперед у зменшенні обсягів утворення відходів та раціоналізації використання природних ресурсів. Однією з ключових екологічних проблем у регіонах із порушеною інфраструктурою є масове накопичення пластикової тари, пов'язане з розподілом привозної питної води. Використання одноразових пляшок і каністр супроводжується утворенням значних обсягів полімерних відходів, утилізація яких у кризових умовах є обмеженою або неможливою. Унаслідок цього зростає ризик забруднення ґрунтів і поверхневих вод, формування стихійних звалищ та вторинного техногенного навантаження на довкілля.

Застосування автономних установок очищення води дозволяє суттєво знизити потребу в бутильованій воді, оскільки підготовка ресурсу здійснюється безпосередньо в місці споживання. Це сприяє скороченню потоків пластикових відходів, зменшенню антропогенного тиску на локальні екосистеми та зниженню вуглецевого сліду, пов'язаного з транспортуванням, зберіганням і розподілом води.

Додатковою екологічною перевагою автономних систем є створення передумов для повторного та раціонального використання води. Локальне очищення дозволяє оптимізувати розподіл очищеного ресурсу між різними видами побутового та обмеженого технічного використання, що сприяє зменшенню загального обсягу водозабору з природних джерел. Такий підхід є особливо актуальним для регіонів із деградованими водними екосистемами та обмеженою здатністю до природного відновлення водних ресурсів. У сукупності це формує екологічно збалансовану модель водокористування, орієнтовану на зменшення ресурсних втрат і контроль екологічних наслідків експлуатації води.

Висновки. Проведені аналітичні, експериментальні та конструктивно-технологічні дослідження дозволяють розглядати систему водопостачання та водоочищення не лише як окремий інженерний об'єкт, а як багатокомпонентну соціо-технічну систему, стійкість якої визначається взаємодією технічних, енергетичних, екологічних і гуманітарних чинників. Послідовний аналіз історичних передумов розвитку водогосподарського

комплексу України, сучасного стану інфраструктури, наслідків воєнних дій, а також результати власних модельних і експериментальних досліджень створюють цілісне підґрунтя для узагальнення отриманих результатів.

Проведене дослідження підтверджує, що системи централізованого водопостачання України перебувають у стані підвищеної структурної вразливості, яка формується внаслідок тривалого фізичного зношення інфраструктури, високої енергоємності технологічних процесів, значних втрат води та обмежених можливостей оперативного відновлення в умовах воєнних дій. Руйнування магістральних водогонів, насосних станцій і споруд водопідготовки, ускладнення логістики реагентів та перебоїв електропостачання істотно знижують здатність традиційних систем забезпечувати стабільну якість і надійність водопостачання, особливо у прифронтових та деокупованих регіонах.

Аналіз якості води у водних об'єктах Харківської області та інших регіонів засвідчив зростання хімічного, мікробіологічного й техногенного навантаження на джерела водопостачання, що посилюється руйнуванням каналізаційної інфраструктури, підтопленням територій і деградацією санітарних охоронних зон. Виявлені перевищення за показниками сполук азоту, важких металів, органічних забруднювачів і мікробіологічних індикаторів підтверджують необхідність багатоступеневої підготовки води навіть для джерел, які раніше вважалися відносно стабільними за якістю.

Отримані результати свідчать, що децентралізовані та автономні системи очищення води набувають ключового значення як елемент підвищення стійкості водозабезпечення. Їх ефективність зумовлена можливістю функціонування незалежно від протяжних мереж, зменшеними втратами ресурсу та здатністю адаптуватися до змінної якості вихідної води. У цьому контексті мультибар'єрний підхід, що поєднує механічну фільтрацію, озонування та ультрафіолетове знезараження в межах компактної автономної установки, демонструє як технологічну доцільність, так і гуманітарну значущість.

Математичне моделювання процесу фільтрації забезпечило перехід від емпіричного вибору параметрів до науково обґрунтованого формування режимів роботи фільтрувального елемента. На підставі моделі визначено допустимі швидкості фільтрування, граничні втрати напору та тривалість фільтроциклу, що забезпечило стабільність роботи першого етапу очищення і створило необхідні гідродинамічні умови для ефективної реалізації процесів озонування та ультрафіолетового знезараження. Таким чином, математичний апарат став інструментом переходу від теоретичного опису до практичного реалізованого режиму експлуатації системи.

Експериментальні дослідження ультрафіолетового знезараження підтвердили вирішальний вплив матеріалів корпусу, гідродинамічного режиму та тривалості експозиції на ефективність інактивації мікроорганізмів. Показано, що використання УФ-прозорих матеріалів, керованої рециркуляції та оптимізованих часових інтервалів опромінення дозволяє досягати високих показників мікробіологічної безпеки без істотного зростання енергоспоживання. Аналогічно, оптимізація режимів озонування з використанням імпульсної подачі забезпечує досягнення необхідного окиснювального ефекту за знижених енергетичних витрат і мінімізації залишкових концентрацій озону у воді.

Енергетичний аналіз показав, що запропонована схема очищення характеризується низькою питомою енергоємністю, що робить її придатною для живлення від автономних джерел електроенергії, зокрема акумуляторних батарей і відновлюваних джерел малої потужності. Це істотно розширює можливості практичного застосування системи у польових умовах, мобільних пунктах водопідготовки та під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Узагальнення отриманих результатів дозволяє стверджувати, що поєднання математичного моделювання, експериментальної верифікації та інженерної реалізації сформувало цілісну концепцію автономної системи очищення води, орієнтованої на підвищення водної безпеки в умовах інфраструктурних руйнувань і нестабільного енергопостачання. Запропоновані підходи мають потенціал для масштабування, адаптації до різних типів джерел води та інтеграції у процеси післявоєнного відновлення водогосподарського комплексу України, поєднуючи технічну ефективність із соціальною та гуманітарною доцільністю.

1. Khmelko I. Administrative decentralization in post communist countries: The case of water management in Ukraine. *Journal of Political Science, Government and Politics*. Vol. 1, N. 1, pp.1-12, 2012.
2. Keudel, O., & Huss, O. (2024). Polycentric governance in practice: the case of Ukraine's decentralised crisis response during the Russo-Ukrainian war. *Journal of Public Finance and Public Choice*, 39(1), 10-35. Retrieved Nov 13, 2025, from <https://doi.org/10.1332/25156918Y2023D000000002>
3. UNICEF: Press release (2022, October 14) UNICEF delivers water and hygiene supplies to support 3 million people in Ukraine. Retrieved from <https://www.unicef.org/ukraine/press-releases/unicef-donates-water-and-hygiene-supplies-support-3-million-people-ukraine>
4. Кравченко, О., Куба, Т., Потапенко, С. ., Хоружий, В., Аргатенко, Т., & Бакуновський, О. . (2023). Планування та організація децентралізованих систем водопостачання у воєнний період в Україні. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*, (44), С. 29-39. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.29-39>

5. Buglak, O. V., Boiko, K. Y., Lunova, O. V. Armed conflict as an environmental risk factor at water supply facilities in eastern Ukraine (case study of “Voda Donbassa” utility company’s Siverskyi Donets–Donbas canal). *Environmental Safety and Natural Resources*, 31(3), pp. 23-32, 2019. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2019.3.23-32>
6. Nazarenko, O. Integrated water resources monitoring system within the context of national water management policy. *Ecological Safety*, (2), pp. 35-42, 2024. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/122>
7. Snizhko, S. Ukraine’s water security under pressure: climate change, infrastructural damage and environmental risks. *Water Security*, Vol.23, 2024, 100182. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2024.100182>
8. Землянська, О. В., Полукаров, Ю. О., Качинська, Н. Ф., Ковтун, А. І., Праховнік, Н. А., & Полукаров, О. І. (2023). Environmental damage to water resources of Ukraine as a result of Russia’s military aggression. *Scientific Notes of Lviv University of Business and Law*, (36), 4-13. Retrieved from <https://nzlubp.org.ua/index.php/journal/article/view/666>
9. Sergieieva, K. Machine learning-based monitoring of war-damaged water and sewerage infrastructure in Ukraine. *CEUR Workshop Proceedings*, Volume 3790, 2024. <https://ceur-ws.org/Vol-3790/paper37.pdf>
10. Shestopalov O. Investigation of the impact of the technical condition of water supply systems on drinking water quality / O. Shestopalov , S. Kulinich, N. Kanunnikova, H. Kniazieva, R. Tomashevskiy, B. Vorobiov, O. Haiduchok, A. Sakun // *Journal of Chemistry and Technologies*. - 2025. – Vol. 33(3). – P. 641-649. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v33i3.324281>
11. Kyiv School of Economics. Report on damages to infrastructure from the destruction and repair in Ukraine’s housing and communal services sector: water supply and sewerage facilities. Kyiv, 2024. https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/05/Eng_01.01.24_Damages_Report.pdf
12. Hapich H. Water security consequences of the Russia-Ukraine war. *Environmental Sciences Europe*, 2024. DOI: 10.1186/s12302-024-00745-2.
13. Keudel O. Polycentric governance in practice in Ukraine’s local authorities. *Journal of Public Finance and Public Choice*, 2024. <https://bristoluniversitypressdigital.com/view/journals/jpfpc/39/1/article-p10.xml>
14. Linenko, Ye. O., Nechyporenko, D. I., Shkop, A. O., Lifer, V. Ye. Integrated analysis of wastewater treatment methods contaminated with petroleum products. *Ecological Sciences*, 61, pp. 151–155, 2025.
15. Bosiuk, A., Shkop, A., Kulinich, S., Loboiko, V., Sakun, A., Shestopalov, O., Filenko, O. The results of surface wastewater treatment of a machine-building enterprise from petroleum product contamination. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, 16, pp. 202–210, 2024. <https://doi.org/10.17683/ijomam/issue16.23>
16. Кануннікова Н.О. Сучасний стан водних ресурсів басейну Дніпра у порівнянні з річками інших країн / Н.О. Кануннікова , О.Г. Гайдучок, Р.С.Томашевський, Б.В. Воробйов, Г.О. Князева, А.О. Сакун, О.В. Шестопалов // *Український журнал природничих наук*. – Житомир: Видавничий дім «Гельветика», 2024. - №9. – С.314-322.
17. Haiduchok, O., Shestopalov, O. V., Kanunnikova, N. O., Tomashevskiy, R. S., Sakun, A. O., Vorobiov, B. V., Kniazieva, H. O., Kriuchkova, V. V., Kulinich, S. V., Titov, A. A. Potential of reused textile and cartridge-based filter for enhanced water filtration efficiency. *Journal of Ecological Engineering*, 26(7), pp. 146–156, 2025. <https://doi.org/10.12911/22998993/203364>
18. Пат. на кор. мод. № 158928 Україна, МПК C02F1/32 C02F1/78. Пристрій для очищення та підготовки води до вживання / Б.В. Воробйов, Р.С. Томашевський, О.Г. Гайдучок; заявник та патентовласник Воробйов Б.В., Томашевський Р.С. – № u202401389; заяв. 15.03.2024; опубл. 09.04.2025, Бюл. №15/2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1850722/>
19. Karahiaur A. Reused fabrics in three-layer filters: performance and modeling / A. Karahiaur, O. Haiduchok, O. Syrovatskyy, A. Titov, O. Shestopalov, A. Shkop, A. Bosiuk, L. Petrescu // *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics – IUOMAM*, 2025. –Vol. 22 (1). – P. 60 – 66.

УДК 338.48:316.334.2

Худо Володимир Володимирович

Кандидат економічних наук, доцент, професор

ORCID: 0009-0000-3971-7373

Львівський національний університет імені Івана Франка

5.4. Соціальний капітал як стратегічний ресурс розвитку готельно-ресторанного бізнесу: вітчизняний та міжнародний досвід

У тексті розкрито сутність соціального капіталу як стратегічного нематеріального ресурсу розвитку готельно-ресторанного бізнесу. Обґрунтовано його роль у формуванні довіри, лояльності клієнтів, стабільності персоналу та довгострокових конкурентних переваг підприємств індустрії гостинності. Проаналізовано особливості формування соціального капіталу в міжнародній і вітчизняній практиці з урахуванням досвіду провідних готельних мереж та українських компаній. Доведено, що соціальний капітал виступає ключовою передумовою сталого розвитку та ефективного стратегічного управління у сфері гостинності. Ключові слова: соціальний капітал, готельно-ресторанний бізнес, індустрія гостинності, довіра, лояльність, репутація, сталий розвиток.

Соціальний капітал є однією з базових категорій сучасної економічної та управлінської науки, що відображає роль нематеріальних чинників у забезпеченні сталого розвитку підприємств. На відміну від матеріальних і фінансових ресурсів, соціальний капітал формується через систему соціальних зв’язків, норм і довіри, які забезпечують узгодженість дій економічних агентів [1; 2]. У сфері готельно-ресторанного бізнесу його значення істотно зростає, оскільки результати діяльності безпосередньо залежать від якості комунікації, репутації та здатності формувати позитивний клієнтський досвід.

Теоретичні засади концепції соціального капіталу були сформовані у працях П. Бурдьє, Дж. Коулмана та Р. Патнема, які трактували його як сукупність ресурсів, вбудованих у мережі соціальної взаємодії та довіри [1-3]. Подальші дослідження розширили це розуміння, пов’язавши соціальний капітал із формуванням конкурентних переваг, ефективністю управління та стійкістю організацій [4]. Для підприємств індустрії