

АНАЛІЗ РОБОТИ БАГАТОСТУПЕНЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ УСТАНОВКИ ДООЧИЩЕННЯ ВОДОПРОВІДНОЇ ВОДИ В УМОВАХ ДІЮЧОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ШЛЯХИ ЇЇ УДОСКОНАЛЕННЯ

І.Ю. Рой, Л.К. Патюк, Н.А. Клименко

Інститут колоїдної хімії і хімії води імені О. В. Думанського НАН України, м. Київ

e-mail: roy_inka@ukr.net

Досліджено мікробіологічні показники роботи установки водопідготовки та визначено технічні та технологічні умови, необхідні для забезпечення дотримання нормативних мікробіологічних характеристик якості доочищеної водопровідної води, призначеної для використання в технологічному процесі. Встановлено, що фактичний рівень розвитку мікрофлори, який спостерігався на завершальному етапі водопідготовки, в деяких випадках, перевищував встановлений проектом норматив, а саме 30 КУО/100см³. При цьому інтенсивність розвитку бактерій, по всій технологічній схемі, відрізнялася як за етапами обробки, так і за періодами експлуатації, що говорить про тенденцію до локального та сезонного розвитку мікрофлори. З проб води після вугільних фільтрів і з гранульованого активованого вугілля (ГАВ) були виділені бактерії, які відновлюють хлорати. Культури продемонстрували високу активність відновлення хлору, яка для зразків ГАВ досягала 68,3 %, а для бактерій, виділених з проб води після вугільних фільтрів, становила 79,2 %. Виділені мікроорганізми, що відновлюють кисневі сполуки хлору, суттєво знижують ефективність знезаражування води і дезінфекції обладнання гіпохлоритом натрію (NaClO). Визначено основні джерела контамінації за етапами обробки, які умовно можна розділити на зовнішні, коли мікроорганізми потрапляють в систему обладнання установки зовні з водою, що надходить на очищення, або повітрям, і внутрішні – це осередки, в яких відбувається розвиток мікрофлори з подальшим розповсюдженням бактеріальних клітин за потоком води, що очищується. Запропоновано рекомендації щодо вдосконалення існуючої технології знезараження води і обмеження небажаного розвитку мікрофлори в системі водоочисного обладнання з метою забезпечення нормативних показників якості очищеної води за мікробіологічними показниками.

Ключові слова: підготовка питної води, гранульоване активоване вугілля (ГАВ), бактерії, біоплівка, хлорування, гіпохлорит натрію (NaClO).

Вступ

Забезпечення необхідної якості питної води, яка використовується в харчовому виробництві, є актуальною науковою та виробничою проблемою. Важливою складовою її вирішення є забезпечення дотримання санітарно-гігієнічних вимог до якості води за мікробіологічними показниками для запобігання загрози поширення інфекційних захворювань з продуктами харчування і напоями. Мікробіологічні показники безпеки питної води нормуються міжнародними, загальнодержавними, відомчими та сертифікаційними технологічними нормативами на продукцію певних виробництв [1-3]. Для дотримання встановлених нормативів мікробіологічної безпеки застосовуються різні методи та обладнання знезаражування води. Сучасні технології, такі як нанофільтрація, частково спираються на стратегію зменшення поживних речовин в питній воді, що значно знижує рівень органічних речовин, але не в змозі радикально скоротити кількість бактеріальних клітин або їх культивацийний потенціал всередині біоплівки [4,5].

Запобігання утворення бактеріальних біоплівок також пов'язане з практикою дезінфекції. Серед найбільш поширених за економічністю і ефективністю дії є хлорування води, але ряд досліджень продемонстрували його обмежену ефективність у забезпеченні необхідного рівня знезаражування води. Дійсно, більшість традиційних дезінфікуючих засобів

(хлор, хлорамін) поглинаються в результаті реакцій з продуктами корозії і відкладень [6,7], матеріалами трубопроводів, технічним устаткуванням [8-10] та екзополімерними речовинами [11].

Відомо, що навіть при безперервному хлоруванні розподільних систем питної води (наприклад, від 0,1 до 0,4 мг Cl₂/дм³), ріст біоплівки, пік активності бактерій і видовий склад варіюється залежно від концентрації дезінфіканта [12]. Допоміжні заходи щодо видалення біоплівки методом додаткової промивки водою навряд чи будуть ефективними через, зокрема, в'язкопружні та еластичні властивості біоплівкової системи [13-17].

Біоплівки питної води представляють собою складний біофізичний світ, вбудований в екзополісахаридну екзополімерну матрицю (ЕПС), чия згуртованість - когезія, обумовлена електростатичними взаємодіями мультівалентних зшиваючих катіонів, які з'єднують негативно заряджені сайти [18], та гідрофобними взаємодіями [19,20]. ЕПС матриця біоплівки відіграє ключову роль в резистентності до дезінфікуючих засобів [21, 22]. Тому ефективні процедури знезараження повинні бути направлені на руйнування ЕПС для того, щоб дозволити дезінфікуючим засобам швидко дифундувати в бактеріальну клітину. Було з'ясовано [23], що хімічна обробка розведеним NaOH послаблює механічні властивості біоплівкових кластерів, які швидко деформуються в напрямку потоку. Також [24,25], виявили, що хлор не створює належного ефекту послаблення механічних властивостей на біоплівці синьогнійної палички. Але в [26] показали ефективність хлору в послабленні механічної згуртованості біоплівки епідермального стафілокока і перешкоджанні розвитку біомаси. В [27] показали значне зниження ЕПС матриці біоплівки під дією галогенованих окисників або озону і чіткий взаємозв'язок між видаленням ЕПС і швидкістю інактивації бактерій.

Для промислового очищення води і доочищення водопровідної води найчастіше використовують сорбційні фільтри на основі ГАВ. Але, як показує досвід експлуатації вугільних фільтрів, навіть при високих показниках чистоти води, що надходить на вугільні фільтри, і періодичних термічних санаціях (промивка водою при 95°C протягом 2,5 год) неможливо призупинити розвиток мікрофлори на тривалий час. У період санаційної обробки фільтра гарячою водою, вцілілі одиничні планктонні клітини починають процес активного формування мікроколоній і створення біоплівки, як способу виживання в екстремальних умовах. Вже через три доби після термічної обробки на поверхні ГАВ спостерігається формування біоплівки, що призводить до так званої біологічної активації вугілля (БАВ) [28-30]. Бактеріальна колонізація і проліферація може призвести до корисних та / або негативних ефектів: сприяє видаленню природних органічних речовин біодеградацією органічних сполук; з часом може сприяти засміченню фільтра, що робить необхідністю частіше проводити зворотню промивку; може призвести до утворення анаеробних і / або мертвих зон; може погіршувати якість води внаслідок небажаного відриву мікроорганізмів від БАВ [31-33].

Швидкість і ступінь утворення біоплівки залежить від багатьох факторів, включаючи якість води (концентрація субстрату стимулюючого ріст бактерій), типу ГАВ, гідравлічних умов, температури, режиму зворотньої промивки [31, 34 - 36]. Вплив цих факторів на розвиток біоплівки не було вивчено в достатній мірі і потребує подальшого дослідження, особливо в умовах повномасштабної промислової установки [33,37]. Таким чином, навіть застосування відомих і перевірених методів дезінфекції води під час її очищення та кондиціонування згідно вимог пов'язане з необхідністю пошуку технічних і технологічних рішень, адаптованих до умов виробництва.

Мета роботи – дослідити мікробіологічні показники роботи установки водопідготовки та визначити технічні та технологічні умови, необхідні для забезпечення дотримання мікробіологічних характеристик якості доочищеної водопровідної води, призначеної для використання в конкретному технологічному процесі.

Методика експерименту

Обстеження і дослідження установки водопідготовки виконували в виробничих умовах при діючому в штатному режимі експлуатації обладнанні. Вода, яка пройшла всі стадії підготовки та доочищення, є вихідною сировиною при виробництві спеціальних напоїв. У систему водопідготовки вода надходила з міського водопроводу і відповідала нормативним вимогам до питної води (ДСанПіН 2.2.4-400-10) [1]. З метою доочищення її пропускали через систему очисних пристроїв, що складаються з резервуарів-накопичувачів водопровідної води, піщаних фільтрів, вугільних фільтрів, Н-катіонітових фільтрів, дегазатора, буферних резервуарів очищеної води. Для попередження розвитку небажаної мікрофлори в технології водопідготовки передбачена дезінфекція обладнання та знезараження води, яку проводять у трьох точках: в резервуарах-накопичувачах (перше хлорування); перед етапом фільтрації води на піщаних фільтрах (друге хлорування); при зберіганні очищеної води в буферних резервуарах (третє хлорування). Знезараження здійснювали NaClO . Вважається, що одним з найбільш ефективних засобів для видалення біоплівки є розчин NaClO , який здатний розчинити органічний екстрацелюлярний матрикс біоплівки, проникаючи в глибокі шари бактеріальних конгломератів [38]. Дози NaClO становили: перше хлорування - у кількості необхідній для забезпечення концентрації вільного хлору на рівні 0,4 - 0,5 мг/дм³; друге хлорування - доведення вмісту вільного хлору до 0,9 мг/дм³; третє хлорування - забезпечення залишкової концентрації вільного хлору 0,04 мг/дм³. Дезінфекцію обладнання проводять 2% - ним розчином NaClO . Раз на 7-8 діб проводилась регенерація вугільних фільтрів, при якій передбачена теплова обробка завантаження за схемою: підігрів води до 95°C, пропарка 2,5 год.

Застосована схема передбачає забезпечення знезаражування води та утримання рівня розвитку мікроорганізмів в обробленій воді в діапазоні значень, що не повинні перевищувати 30 КУО/100см³.

Для мікробіологічних досліджень стерильно відбирали зразки води на різних етапах очищення установки водопідготовки, а саме вода з накопичувальних резервуарів, після піщаних фільтрів, після вугільних фільтрів, вода після Н-катіонітових фільтрів, після дегазатора і очищена вода з буферних резервуарів. Також були досліджені зразки активованого вугілля з вугільних фільтрів, як головного осередка утворення активної біоплівки, яка є одним із патогенетичних факторів формування хронічних інфекційних процесів [35,37,39].

Оцінку загальної контамінації води в системі установки водопідготовки за етапами обробки здійснювали за результатами визначення загального мікробного числа (ЗМЧ) та числа бактерій групи кишкових паличок (БГКП) [40,41].

Для вивчення мікробних угруповань, що можуть існувати в специфічних еконішах водоочисного обладнання, враховуючи специфіку дезінфектантів, що застосовуються при водообробці в пробах води за етапами водопідготовки та пробах ГАВ із загрузки фільтрів визначали наявність бактерій, що відновлюють кисневі сполуки хлору – хлорати. Накопичувальну культуру отримували шляхом посіву зразків води та змивів із загрузки вугільних фільтрів (наважку ГАВ масою 1 г відмивали 25 см³ 9%-вим розчином NaCl) на основне мінеральне середовище, що містить (г/дм³): $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – 1,0; KH_2PO_4 – 1,0; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,2; NH_4Cl – 2,0; МПБ – 10% від об'єму середовища; H_2O дист. – 1,0 л; рН - 3,5. Як акцептор електронів вносили KClO_3 – 2,0 г/дм³ (або NH_4ClO_4 – 1,0 г/дм³). Культивування проводили в умовах обмеженого доступу кисню, в пробірках, повністю заповнених середовищем і закритих гумовими пробками при температурі 34°C, час культивування 48 – 120 год. Ріст хлоратвідновлюючих бактерій визначали за збільшенням оптичної густини культуральної рідини. Наявність процесу хлоратредукції контролювали за вмістом кисневих сполук хлору в середовищі. Кількість хлоратів визначали аналітично [42].

Кількісний склад мікрофлори повітря в приміщенні, в якому розміщувались установки водопідготовки визначали седиментаційним методом [43,44].

Для визначення умов розвитку мікроорганізмів у воді за етапами очищення визначали органолептичні показники і хімічні показники якості води, що впливають на органолептичні

властивості, а також токсикологічні показники нешкідливості хімічного складу питної води, що має відповідати нормам ДСТУ 7525:2014 «Вода питна» [2] і Директиві ЄС [3]. Органолептичні показники якості води (запах, кольоровість, каламутність) визначали за ГОСТ 3351. Хімічні показники якості, що впливають на органолептичні властивості питної води, а саме водневий показник (рН) визначали за ДСТУ 4077, сухий залишок (мінералізація загальна) – за ГОСТ 18164, жорсткість загальна – за ГОСТ 4151, лужність загальна - за ДСТУ ISO 9963. Речовини неорганічної природи, а саме сульфати визначали з ГОСТ 4389, хлориди – за ГОСТ 4245, залізо загальне (Fe) – ГОСТ 4011, марганець (Mn) – ГОСТ 4974, кальцій (Ca) та магній (Mg) – за ДСТУ ISO 6058 та 6059, відповідно. Також визначали токсикологічні показники нешкідливості хімічного складу питної води, а саме вміст нітратів та нітритів за ГОСТ 18826 та ГОСТ 4192, відповідно. Було визначено інтегральні показники води: окиснюваність перманганатну за ГОСТ 23268.12 та загальний органічний вуглець за ДСТУ EN 1484. Вміст загального залишкового хлору було визначено йодометричним методом; вміст вільного активного хлору - метиленоранжевим методом (ГОСТ 18190, ДСТУ ISO 7393 – 3).

Результати та їх обговорення

Оцінюючи фактичну ефективність застосування описаної вище системи хлорування за етапами водопідготовки та дезінфекції системи і обладнання, було отримано наступні результати мікробіологічних досліджень. Як відомо, визначення такого показника як ЗМЧ на різних етапах підготовки води несе суттєву інформацію щодо ефективності технології її очищення та знезараження. Узагальнені вибіркові результати за 2014 – 2015 рік наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Вибіркові показники мікробної контамінації води в системі установки водопідготовки за етапами обробки

Дата	Загальне мікробне число, КУО/100 см ³					
	Резервуари накопичувачі	Піщані фільтри	Вугільні фільтри	Н-катионні фільтри	Дегазатор	Буферні резервуари очищеної води
10.09.2014	140	72	68	64	80	42
13.10.2014	98	81	60	52	60	30
10.11.2014	83	43	46	35	39	25
15.12.2014	80	18	25	27	30	16
26.01.2015	69	12	18	21	36	12
23.02.2015	74	16	20	23	32	10
26.03.2015	103	20	36	44	57	16
20.04.2015	146	29	51	46	50	27
25.05.2015	170	59	76	69	74	36
22.06.2015	198	98	194	125	87	49
27.07.2015	247	173	275	189	112	58
19.08.2015	216	147	256	180	167	70

Як видно з отриманих даних, фактичний рівень розвитку мікрофлори, який спостерігався на завершальному етапі водопідготовки, в деяких випадках, перевищував норматив, передбачений проектом для очищеної води, а саме 30 КУО/100см³. При цьому інтенсивність розвитку бактерій по всій технологічній схемі відрізнялася як за етапами обробки, так і за сезонами експлуатації. Інтенсивність мікробної контамінації зростала починаючи з березня-квітня і досягала максимальних значень в період травень-серпень на всіх етапах водопідготовки, з поступовим зниженням і стабілізацією на певному рівні в вересні-квітні в резервуарах очищеної води. В періоди найвищого розвитку максимальна концентрація мікроорганізмів, що визначалась у воді після вугільних фільтрів, досягала 275 КУО/100 см³.

Дослідження проб води на присутність колиформних мікроорганізмів за весь період спостереження показали відповідність якості води існуючим санітарним вимогам [1–3].

Стосовно етапів обробки води найбільша контамінація спостерігалась в резервуарах-накопичувачах, вугільних та Н-катионітових фільтрах. Це може свідчити про наявність осередків внутрішньої контамінації системи очищення води. Випадки зниження концентрації мікроорганізмів у воді після вугільних фільтрів до рівня 18 – 60 КУО/100 см³ в пробах за жовтень - квітень можна пояснити результатами періодичної термічної регенерації ГАВ, а також загальною низькою температурою води, що обробляється в листопаді, грудні, січні та лютому. Аналогічні тенденції сезонного зменшення рівня мікробної забрудненості води в осінньо - зимовий період спостерігалися на всіх етапах водопідготовки. Крім того, значні коливання величини ЗМЧ в досліджених пробах води з одного певного обладнання можна пояснити впливом планових технологічних заходів з його обслуговування (миття та дезінфекція резервуарів, дегазатора, пропарка вугільних фільтрів, регенерація завантаження Н-катионітових фільтрів кислотою та ін.). Найбільш прийнятна ситуація за мікробіологічними показниками чистоти спостерігалась у воді після піщаних фільтрів та в буферних резервуарах очищеної води. В останніх певне перевищення нормативного показника спостерігалась в пробах за травень – вересень, при цьому максимальна концентрація мікроорганізмів становила 70 КУО/100 см³ і була зафіксована у серпні місяці.

Таким чином, в узагальненому вигляді розглянуті матеріали лабораторного мікробіологічного контролю за роботою установки водопідготовки дають підстави для попереднього висновку: в процесі знезараження води за описаною технологією спостерігаються тенденції сезонного та локального (за етапами водопідготовки) розвитку мікрофлори. Кількісні характеристики мікробіологічного забруднення можуть перевищувати показники, які встановлено для очищеної води, що використовується в технологічному процесі.

Відомо, що розвиток мікроорганізмів залежить від умов середовища існування, води в технологічних системах і обладнання установки водопідготовки. Для попереднього визначення можливого впливу умов існування на мікрофлору були проведені аналітичні дослідження якості води до і після її обробки. Було визначено органічні та мінеральні речовини, наявність яких може прогнозовано впливати на розвиток водної мікрофлори установки водопідготовки. Результати аналізів наведено в таблиці 2. Як видно з таблиці 2, показники води до обробки в основному відповідали або були близькими до санітарних норм [1–3], а після обробки повністю відповідали згаданим стандартам.

Додаткові дослідження кількісних показників вмісту органічних речовин у воді, як показника, який найбільш суттєво впливає на темпи розвитку мікроорганізмів показали, що органічна складова не є лімітуючим фактором середовища. Перманганатна окиснюваність (ПО) в пробах води за вибраними етапами обробки (табл.3) коливалась в межах 1,6 – 3,5 мг/дм³. Збільшення ПО після вугільних фільтрів та дегазатора свідчать, з одного боку, про насичення фільтруючого завантаження цих фільтрів органікою, в результаті чого відбувається десорбція забрудників у воду, а з другого – про забруднення води продуктами життєдіяльності мікроорганізмів в біоплівці на завантаженні фільтра.

Виходячи з отриманих характеристик хімічного складу води і мікробіологічних показників її забрудненості на різних етапах технологічного процесу очищення можна оцінити її середовище як придатне для розвитку сапрофітної мікрофлори за рахунок наявності достатньої кількості органічних і мінеральних компонентів.

Таблиця 2. Хімічні показники якості води перед та після її доочищення на установці водопідготовки

Найменування показників	Показники якості води до очищення	Показники якості води після очищення	Норматив для води систем централізованого водопостачання [1-3]	Методи контролювання
Запах, бал	2	1	≤ 2	ГОСТ 3351
Кольоровість, градуси	3	< 2	≤ 20	ГОСТ 3351, ДСТУ ISO 7887
Каламутність (по каол.), мг/дм ³	1,9	< 0,2	≤ 1,5	ГОСТ 3351, ДСТУ ISO 7027
Водневий показник (рН)	7,6	6,95	6,5- 8,5	ДСТУ 4077
Сухий залишок (мініралізація загальна), мг/дм ³	523	188	100 - 1000	ГОСТ 18164
Жорсткість загальна, мг-екв/дм ³	7,6	2,8	1,5- 7,0	ГОСТ 4151, ДСТУ ISO 6059
Лужність загальна, мг-екв/дм ³	6,6	1,0	0,5 – 6,5	ДСТУ ISO 9963
Залізо загальне, мг/дм ³	0,25	< 0,05	≤ 0,2	ГОСТ 4011, ДСТУ ISO 6332
Кальцій, мг/дм ³	128	24,1	≤ 100	ДСТУ ISO 6058
Магній, мг/дм ³	14,4	19,2	≤ 30	ДСТУ ISO 6059
Марганець, мг/дм ³	0,28	< 0,03	≤ 0,05	ГОСТ 4974, ДСТУ ISO 11885
Нітрати, мг/дм ³	1,0	1,0	≤ 45	ГОСТ 18826, ДСТУ ISO 7890
Нітрити, мг/дм ³	<0,02	<0,02	≤ 0,1	ГОСТ 4192, ДСТУ ISO 6777
Сульфати, мг/дм ³	78	67	≤ 250 (500)	ГОСТ 4389, ДСТУ ISO 10304-1
Хлориди, мг/дм ³	37	37	≤ 250 (350)	ГОСТ 4245, ДСТУ ISO 9297
Окиснюваність перманганатна, мгО ₂ /дм ³	1,6	1,6	≤ 2,0	ГОСТ 23268.12
Загальний органічний вуглець, мг С/дм ³	4,4	3,8	≤ 4	ДСТУ EN 1484

Таблиця 3. Вибіркові показники вмісту органічних речовин у воді за етапами обробки.

Проби води після етапів обробки	Перманганатна окиснюваність, мгО ₂ /дм ³				
	22.03.2015	20.04.2015	25.05.2015	22.06.2015	27.07.2015
Піщані фільтри	1,7	2,5	2,9	2,8	2,9
Вугільні фільтри	2,9	3,0	3,1	3,5	3,2
Н-катионітові фільтри	2,7	2,6	2,7	2,6	2,6
Дегазатор	1,6	2,9	2,6	2,8	2,7

В системі водопідготовки було виявлено наявність бактерій, які відновлюють кисневі сполуки хлору – хлорати. Ці сполуки утворюються у воді внаслідок присутності активного

хлору. Наявність мікроорганізмів, що відновлюють хлорати реєструвались у пробах води після вугільних фільтрів ($10^2 - 10^3$ КУО/см³), а також у воді з резервуарів-накопичувачів (10 КУО/см³) та дегазатора (10 КУО/см³).

Також хлоратредукуючі бактерії виявили в зразках активованого вугілля із загрузки вугільних фільтрів (10^3 КУО/см³). Виділені культури продемонстрували високу активність відновлення хлору (табл. 4), яка для зразків активованого вугілля становила 63,8 %, а для бактерій, виділених з проб води після вугільних фільтрів, досягала показника в 79,2% активності відновлення хлоратів, що дає підстави вважати, що у вугільних фільтрах склалися умови, найбільш сприятливі для автоселекції хлоратвідновлюючих бактерій.

Таблиця 4. Показники активності хлоратвідновлюючих бактерій у воді та активованому вугіллі за етапами водопідготовки

Етапи очищення	Кількість бактерій, КУО/см ³	Активність відновлення хлоратів	
		Залишкові хлорати, г/дм ³	Кількість відновлених хлоратів, %
Резервуари-накопичувачі	10	1,54	5,7
Піщані фільтри	–	–	–
Вугільні фільтри	10^3	0,34	79,2
Н-катіонітові фільтри	–	–	–
Дегазатор	10	1,52	7,4
Активоване вугілля	10^3	0,51	68,3

Таким чином, результати мікробіологічних досліджень підтвердили припущення стосовно існування в системі обладнання установки водопідготовки сприятливих умов для розвитку мікроорганізмів різних фізіологічних груп. Особливо це стосується завантаження вугільного фільтра, який утворює осередок додаткової внутрішньої контамінації водної системи очисної установки. В порожнинах завантаження утворюються мікроділянки – лінзи, що підтримуються поверхневим натягом продуктів метаболізму присутніх у фільтрі мікроорганізмів. Наявність у воді достатньої кількості органічних речовин сприяє розвитку гетеротрофних аеробів, а уповільнений масообмін створює мікроаерофільні умови, які є сприятливими для розвитку факультативних анаеробів, що разом з постійною обробкою активним хлором сприяє розвитку бактерій, що відновлюють кисневі сполуки хлору, і суттєво знижують ефективність існуючої технології знезаражування води і дезінфекції обладнання NaClO. Аналогічно, але в меншій мірі, це стосується Н-катіонітового фільтра та дегазатора.

Результати вибіркового аналізу на вміст хлору у воді (табл. 5) свідчать про те, що режими знезараження води, застосовані на установці, не забезпечують утримання необхідного рівня розвитку мікроорганізмів, а показники вмісту хлору у воді, що обробляється, корелюють з інтенсивністю розвитку мікрофлори за етапами обробки.

Порівняння матеріалів таблиці 1 і таблиці 5 в певній мірі пояснює факт більш інтенсивного розвитку мікрофлори на вугільних та Н-катіонітових фільтрах, які характеризуються незначними концентраціями хлору, та в дегазаторі, де хлор практично відсутній. В протизагагу, на піщаних фільтрах спостерігається більш вдала ситуація за мікробіологічними показниками, де при концентрації загального хлору та вільного хлору 0,25 – 1,2 мг/дм³ і 0,12 – 0,75 мг/дм³, відповідно, рівень розвитку бактерій нижчий у порівнянні з вугільним і Н-катіонітовим фільтрами, де концентрація загального хлору не перевищувала 0,2 мг/дм³, а вільний хлор був присутній в залишкових концентраціях. Також на завантаженнях вугільного та Н-катіонітового фільтрів більше органічного субстрату для розвитку мікроорганізмів (табл.3).

Таблиця 5. Результати аналізів на вміст хлору на різних етапах обробки води установкою водопідготовки

Дата	Показник	Вода після:			
		піщаних фільтрів	вугільних фільтрів	Н-катионітових фільтрів	дегазатора
22.03.15	Хлор залишковий загальний, мг/дм ³	1,2	0,21	–	–
	Хлор залишковий зв'язаний, мг/дм ³	0,45	0,21	–	–
	Хлор вільний, мг/дм ³	0,75	<0,02	–	–
20.04.15	Хлор залишковий загальний, мг/дм ³	0,25	0,1	0,08	0,08
	Хлор залишковий зв'язаний, мг/дм ³	0,13	0,1	0,08	0,08
	Хлор вільний, мг/дм ³	0,12	<0,025	<0,025	<0,025
25.05.15	Хлор залишковий загальний, мг/дм ³	0,68	0,11	0,13	–
	Хлор залишковий зв'язаний, мг/дм ³	0,4	0,11	0,13	–
	Хлор вільний, мг/дм ³	0,28	<0,025	<0,025	–

Під час оцінювання ефективності дози дезінфектанту необхідно враховувати наявність мікроорганізмів, що активно відновлюють хлор. Розвиток таких бактерій не буде пригнічуватись навіть значними дозами хлору. Застосування таких доз при знезаражуванні води на окремих етапах очищення є нераціональним ще й тому, що поряд зі збільшенням експлуатаційних витрат на реагенти, відбувається збільшення концентрації хлорорганічних сполук [45], вміст яких нормується вимогами до якості води, що використовується в харчовій промисловості. Тобто метод хлорування в даному випадку є малоефективним в режимах, які застосовані в технологічному процесі водоочищення. В повній мірі це стосується заходів дезінфекції обладнання і термічної санації завантаження вугільних фільтрів, у зв'язку з тим, що хлоратвідновлюючі бактерії можуть розвиватися при підвищених температурах.

Разом з тим рівень мікробіологічної забрудненості води в системі водопідготовки залежить не тільки від дози дезінфектанту, а також від режимів очищення, технічних і технологічних особливостей застосованого обладнання. За певних умов згадані фактори можуть відігравати суттєву або навіть вирішальну роль в забезпеченні ефективного знезаражування води. Порівняльний аналіз результатів мікробіологічних досліджень, обстеження конструктивних характеристик обладнання і технологічних режимів очищення води, які застосовуються на досліджуваній установці водопідготовки, дають можливість визначити причини небажаного розвитку мікрофлори, шляхи мікробної контамінації, перспективи забезпечення необхідної якості води за мікробіологічними показниками, а також окреслити заходи з удосконалення та оптимізації технологічних режимів.

Розглядаючи узагальнено застосовану багатостадійну технологію знезаражування води слід відзначити достатній рівень заходів, передбачених базовою технологією для контролю бактеріального забруднення, і таким чином, можна припустити, що відхилення від встановлених показників є результатом впливу додаткових неврахованих виробничих факторів, або порушення нормативів обробки.

Вивчення роботи установки водоочищення, проектної та технологічної документації в комплексі з узагальненням результатів мікробіологічних і хімічних досліджень дозволили визначити основні джерела мікробіологічної контамінації води в системі за етапами технологічного процесу очищення. Джерела контамінації на різних етапах обробки умовно

можна поділити на зовнішні, коли мікроорганізми потрапляють в систему обладнання установки зовні з водою або повітрям, і внутрішні – це осередки, в яких відбувається розвиток мікрофлори з подальшим розповсюдженням клітин з потоком води, що очищується.

Розглядаючи перший етап водопідготовки, пов'язаний з накопиченням і першим хлоруванням водопровідної води в резервуарах накопичувачах, слід зазначити, що контамінація в даному випадку може відбуватися із зовнішніх джерел з водою, що надходить із водопроводу, і повітрям вулиці через вентиляційні отвори, які з'єднують приміщення, в якому розташовані резервуари з атмосферою території комбінату. Враховуючи традиційно високі показники мікробіологічної безпеки води, характерні для системи київського водопроводу, а також здійснення хлорування цієї води перед надходженням в резервуари-накопичувачі, водний шлях бактеріального інфікування можна вважати досить обмеженим. Контамінація найбільш вірогідна тільки в періоди сезонного підвищення температури води, що оброблюється, в травні – вересні та в періоди надходження води після ремонтних робіт мережі міського водопроводу. Аналогічно має місце помірний ризик повітряного шляху мікробного забруднення, завдяки наявності рукавних фільтрів на вентиляційних повітропроводах резервуарів, хоча пряме дослідження ефективності їх роботи практично здійснити важко через конструктивні особливості вентиляційної системи.

Таким чином, враховуючи наведене вище, досить високі рівні мікробіологічного забруднення води в резервуарах-накопичувачах можна пояснити наявністю локальних сприятливих умов розвитку мікрофлори в цих технологічних ємностях, а саме: досить тривалий час перебування води в резервуарах, що, при максимальній продуктивності роботи установки (200 м³/год), наближається до 5 годин, а при середній – до 150 м³/год, невдала система водорозподілення в самих резервуарах. Останній фактор зводиться до того, що трубопроводи відведення води після хлорування і відбору її на очищення знаходяться поруч в головній частині резервуарів і не мають пристроїв розсіювання потоку, в результаті чого порушуються умови проточності рідини, створюються застійні зони, в яких вплив хлорування не значний, внаслідок чого відбувається безперешкодний ріст мікроорганізмів. При цьому відбувається поступове обростання стінок резервуарів біоплівкою, особливо на межі розподілу фаз «вода - повітря», а також утворення мулових відкладень на дні з наступним вторинним забрудненням води органічною речовиною біомаси, яка стимулює подальший розвиток мікроорганізмів. Експериментально доведено [46,47], що прикріплення бактерій до поверхонь в системах зберігання питної води сприяє розвитку резистентності до дезінфекції. Це явище додатково пояснює наявність хлоратвідновлюючих бактерій у пробах води з резервуарів-накопичувачів. Таким чином, резервуари-накопичувачі перетворюються на осередок внутрішньої контамінації, яка може поширюватись потоком води по системі очисної установки.

Для піщаних фільтрів джерелом контамінації є вода, що подається на фільтрування з резервуарів-накопичувачів. Але застосування другого хлорування води, що очищується, забезпечує надходження на обробку в піщані фільтри додаткових доз хлору, достатніх для знезараження води і завантаження фільтрів. Своєчасна періодична промивка піщаних фільтрів дозволяє видалити із завантаження нерозчинні домішки, особливо органічного походження, які можуть стимулювати розвиток небажаної мікрофлори. Загалом, піщані фільтри є відносно безпечною, у мікробіологічному відношенні, ланкою технологічного ланцюга очисної установки.

Одним з найбільш суттєвих осередків мікробної контамінації системи водоочисної установки, як показали наші дослідження, є вугільні фільтри. Враховуючи герметичність конструкції, джерелом контамінації є вода, що надходить на сорбційне очищення та безпосередньо ГАВ, яке використовується як завантаження. В даному випадку створюється осередок внутрішньої контамінації за рахунок надходження та сорбції необхідних біогенних елементів на завантаженні фільтра, відведення потоком продуктів метаболізму та процесу дехлорування води завантаженням фільтра. Поряд з поступовим збільшенням концентрації мікроорганізмів різних фізіологічних груп збільшується мультиплікативність механізмів

резистентності до дезінфектанта, тобто примноження можливостей досягнення резистентності кількома механізмами (генетичним, адаптаційним тощо), що характерно для іммобілізованої мікрофлори [48]. Таким чином, під час експлуатації вугільних фільтрів необхідно враховувати поширеність явища розвитку мікрофлори в завантаженні, досягти викорінення якої практично неможливо. Існує тенденція позитивної оцінки розвитку непатогенної гетеротрофної мікрофлори, яка сприяє біологічному видаленню з води компонентів мінеральної та органічної природи (в тому числі хлорорганічних речовин) та біологічній регенерації завантаження [30,35,36].

Джерелом контамінації Н-катионітових фільтрів є вода, що надходить з вугільних фільтрів. Явище біологічного ураження катионітових смол досить поширене і відоме з практики водопідготовки. Але на відміну від вугільних фільтрів, Н-катионітові фільтри за технологічним регламентом знелуження і пом'якшення води регенеруються кислотою досить часто, що позитивно впливає на мікробіологічні показники якості води і завантаження. Таким чином, рівень мікробіологічного забруднення Н-катионітових фільтрів мікробами залежатиме від інтенсивності контамінації з потоком води, що надходить від вугільних фільтрів і вимиванням органічних сполук з матриці іоніту.

Причинами мікробної контамінації води в дегазаторі є особливості конструкції цього апарату, а саме: розвинута поверхня завантаження (кільця Рашига), забезпечення киснем від продувки повітрям і наявність у воді необхідних органічних і мінеральних речовин, які створюють усі умови для розвитку мікроорганізмів у воді, на завантаженні і внутрішніх поверхнях апарату. Контамінація дегазатора відбувається кількома шляхами. Перший – це вода, що надходить на дегазацію. Другий – це атмосферне повітря території промислової зони, яке надходить через вентиляційний повітровід дегазатора. У даному випадку, завдяки роботі витяжної вентиляції приміщення цеху водопідготовки, в період автоматичної технологічної зупинки вентилятора, виникає зворотне переміщення повітря з вулиці через завантаження дегазатора в цех. Інтенсивність цих потоків значна і становила 522 м³/год. Однак, загроза інфікування води повітрям при технологічній продувці завантаження в процесі дегазації виявилась незначною. Мікробіологічні дослідження повітря приміщення цеху в зоні впливу вентилятора (в потоці за 0,2 метра від вентилятора) дозволили визначити концентрацію мікробних клітин в повітрі на рівні 5 - 7 КУО/м³.

Суттєвим конструктивним недоліком дегазатора є недоступність механічного очищення внутрішніх порожнин апарату, для яких обробка дезінфектантом може бути недостатньою, через що існує реальна ймовірність існування внутрішніх осередків життєздатної мікрофлори. Забезпечення можливості доступу персоналу до внутрішніх порожнин накопичувальної ємності дегазатора шляхом встановлення в корпусі люків, які б дали можливість здійснювати періодичну механічну відмивку поверхонь від біологічних нашарувань, дозволило б підвищити якість дезінфікуючих заходів і зменшити негативний вплив дегазатора на бактеріальну забрудненість очищеної води.

Останнім елементом технологічної схеми установки водопідготовки є буферні резервуари чистої води, після яких очищена вода направляється на потреби основного виробництва. Для приведення якості води за мікробіологічними показниками у відповідність технологічним вимогам перед надходженням води у резервуари здійснюється третє хлорування. Але конструктивні особливості системи створюють можливості для мікробної контамінації очищеної води як водним, так і повітряним шляхом. В першому випадку мається на увазі, що розподілення води після хлорування зумовлює можливість надходження води як в буферні резервуари очищеної води, так і відразу на виробництво. Останнє відбувається, якщо одночасно працюють насоси водоочисної установки і насос подачі води на виробництво, тому що заповнення буферних резервуарів відбувається головним чином в паузах роботи насоса подачі води на виробництво. Таким чином, враховуючи незначну відстань між точкою внесення гіпохлориту і обладнанням основного виробництва, період контакту води з хлором під час транспортування води з середньою швидкістю 150 м³/год буде становити 1 - 1,5 хвилин. Наведена експозиція не відповідає вимогам гарантованого знезараження води і, таким чином,

потенційно не виключає можливості надходження життєздатної мікрофлори з водою на виробництво.

Одночасно необхідно враховувати, що загальний об'єм буферних резервуарів (300 м³), навіть при максимальній продуктивності водоочисної установки 200 м³/год, потенційно забезпечує при проточному режимі необхідну експозицію (30 хв.) контакту води з дезінфектантом. Разом з тим, при існуючій системі водорозподілення з паралельною роботою резервуарів технічно не гарантується забезпечення встановленої експозиції хлорування. Одночасно існує реальна можливість утворення застійних зон у верхніх шарах води в резервуарах, в яких завдяки незначним концентраціям (або відсутності) хлору можливий вторинний розвиток мікроорганізмів.

Також джерелом мікробної контамінації може бути інтенсивне надходження повітря в буферні резервуари під час зменшення рівня наповненості при роботі насоса подачі води на виробництво. Повітряні фільтри чи інші пристосування, які запобігають надходженню мікроорганізмів з повітрям в буферні резервуари на вентиляційному трубопроводі відсутні. Таким чином, буферні резервуари потенційно можуть бути осередком вторинної контамінації очищеної води, яка подається на виробництво.

Для забезпечення повної відповідності заходів дезінфекції установки водоочищення необхідно враховувати явище розвитку хлоррезистентних мікроорганізмів. Дезінфекцію завантаження і внутрішніх поверхонь технологічного обладнання розчином NaClO, згідно базової технології водоочищення, слід чергувати обробкою дезінфектантами без хлорного принципу дії. Застосування сучасних біоцидних реагентів дозволить досягти подолання адаптаційної резистентності до хлору і забезпечити необхідну якість знезараження обладнання. З вітчизняних дезінфектантів нового покоління, які не містять хлор до застосування можуть бути рекомендовані «Акватон - 10» (виробник НТЦ «Укрводбезпека»)[49], «Делаксон» (виробник ТОВ «Делана»), «Гуанполісепт» (ТОВ БНВП «РИВС») та ін.

«Акватон - 10» та «Делаксон» допущені до застосування МОЗ України. Вибір реагенту слід визначати, виходячи з порівняльної і вартісної оцінки їх застосування, а також результатів виробничих випробувань.

Висновки

Досліджено мікробіологічні показники роботи установки водопідготовки та визначено технічні та технологічні умови, необхідні для забезпечення дотримання нормативних мікробіологічних вимог до якості доочищеної водопровідної води, яка призначена для використання в технологічному процесі харчового виробництва.

Фактичний рівень розвитку мікрофлори, який спостерігався на завершальному етапі водопідготовки, в деяких випадках, мав перевищення відносно нормативу, передбаченого проектом для очищеної води, а саме 30 КУО/100см³. При цьому інтенсивність розвитку відрізнялася як за етапами обробки згідно технологічної схеми, так і за періодами експлуатації, що говорить про тенденцією до локального (за етапами обробки) та сезонного розвитку мікрофлори. Інтенсивність мікробної контамінації зростала починаючи з березня-квітня і досягала максимальних значень в період травень-серпень на всіх етапах водопідготовки, з поступовим зниженням і стабілізацією на певному рівні в вересні-квітні. В періоди найвищого розвитку максимальна концентрація мікроорганізмів, що визначалась у воді після вугільних фільтрів, досягала 275 КУО/100 см³.

Дослідження проб води на присутність коліформних мікроорганізмів за період спостереження показали у всіх випадках відповідність якості води існуючим санітарним вимогам ДСанПіН 2.2.4-171-10.

Виходячи з отриманих характеристик хімічного складу води і мікробіологічних показників її забрудненості за етапами технологічного процесу очищення можна оцінити її середовище як придатне для розвитку сапрофітної мікрофлори, за рахунок наявності достатньої кількості органічних і мінеральних компонентів.

З проб води після вугільних фільтрів і з ГАВ було виділено мікроорганізми, які відновлюють хлорати в кількості $10^2 - 10^3$ КУО/см³. Аналогічна картина спостерігалась в пробах води з резервуарів-накопичувачів та дегазатора, де кількість хлоратвідновлюючих бактерій становила 10 КУО/см³. Культури продемонстрували високу активність відновлення хлору, яка для зразків ГАВ досягла 68,3 %, а для бактерій, виділених з проб води після вугільних фільтрів, становила 79,2 %. Виділені мікроорганізми, що відновлюють кисневі сполуки хлору, суттєво знижують ефективність знезаражування води і дезінфекції обладнання NaClO.

Визначено основні джерела контамінації на різних етапах обробки, які умовно можна розділити на зовнішні, коли мікроорганізми потрапляють в систему обладнання установки з водою, яка надходить на очищення, або повітрям, і внутрішні – це осередки, в яких відбувається розвиток мікрофлори з подальшим розповсюдженням клітин за потоком води, що очищується. Зовнішні джерела контамінації впливають на якість води у резервуарах-накопичувачах (водопровідна вода, атмосферне повітря), дегазатор (атмосферне повітря), буферних резервуарах чистої води (повітря виробничих приміщень). Осередками внутрішньої контамінації води системи обладнання водопідготовки є резервуари- накопичувачі, завантаження вугільних та Н-катионітових фільтрів, дегазатор, а також буферні резервуари чистої води.

Для вдосконалення існуючої технології знезараження води і обмеження небажаного розвитку мікрофлори в системі водоочисного обладнання з метою забезпечення нормативних показників якості очищеної води за мікробіологічними показниками рекомендується:

1. Удосконалити умови експлуатації резервуарів-накопичувачів слід за рахунок ліквідації застійних зон шляхом інтенсифікації проточності та мінімізації періоду перебування води в резервуарах, а також ізоляції резервуарів від надходження неочищеного атмосферного повітря з території комбінату. Внутрішню поверхню емностей, яка контактує з водою, рекомендовано покривати матеріалами, що не сприяють біообростанню та добре мийються механічно. З метою зменшення трудовитрат і підвищення ефективності дезінфекції резервуарів-накопичувачів, механічну мийку доцільно здійснювати із застосуванням сучасних засобів механізації (апаратів високого тиску, водних пилесосів), які використовуються, наприклад, в практиці обслуговування плавальних басейнів.

2. Своєчасно здійснювати промивку піщаних фільтрів для запобігання накопичення органічних речовин, які стимулюють розвиток небажаної мікрофлори.

3. При термічній санації вугільних фільтрів перевагу доцільно віддавати високотемпературній обробці, а саме паровій регенерації при температурі 110 – 130 °С, яка враховує термостійкість хлоратвідновлюючих мікроорганізмів, які розвиваються в завантаженні вугільних фільтрів.

4. Заходи щодо зниження мікробної контамінації дегазатора повинні бути спрямовані на запобігання надходження в апарат мікроорганізмів з атмосферним повітрям промзони через вентиляційний повітровід. Бажано конструктивно забезпечити можливість доступу обслуговуючого персоналу до внутрішніх порожнин накопичувальної ємності дегазатора, шляхом встановлення люків, для її механічної мийки та дезінфекції.

5. Під час знезараження води в буферних резервуарах система розподілу води повинна забезпечувати проточність системи і експозицію контакту очищеної води з дезінфектантом не менше 30 хв. Вентиляційні трубопроводи резервуарів необхідно обладнати повітряними фільтрами для запобігання надходження мікроорганізмів з атмосферним повітрям.

6. Для подолання небажаного явища розвитку хлоррезистентної мікрофлори під час здійсненні дезінфекційних робіт обробку резервуарів і обладнання водоочисної установки розчином NaClO необхідно чергувати з обробкою дезінфектантами безхлорного принципу дії. Застосування сучасних біоцидних препаратів, наприклад «Акватон - 10», «Делаксон», «Гуанполісепт» і подібних їм за характеристиками, дозволить зменшити адаптивні до хлору властивості мікроорганізмів і забезпечити необхідну якість знезаражування обладнання.

7. Для гарантування забезпечення вимог знезараження доцільно розглянути варіанти застосування бактерицидних установок ультрафіолетового (УФ) опромінення для води, яка пройшла повний цикл очищення.

АНАЛИЗ РАБОТЫ МНОГООРУБЕНЧАТОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДООЧИСТКИ ВОДОПРОВОДНОЙ ВОДЫ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА И ПУТИ ЕЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

И.Ю. Рой, Л.К. Патюк, Н.А. Клименко

Институт коллоидной химии и химии воды имени А. В. Думанского НАН Украины, г. Киев

e-mail: roy_inka@ukr.net

Исследованы микробиологические показатели работы установки водоподготовки и определены технические и технологические условия, необходимые для обеспечения соблюдения нормативных микробиологических характеристик качества доочищенной водопроводной воды, предназначенной для использования в технологическом процессе. Установлено, что фактический уровень развития микрофлоры, который наблюдался на завершающем этапе водоподготовки, в некоторых случаях, имел превышение относительно установленного проектом норматива, а именно 30 КОЕ / 100см³. При этом интенсивность развития бактерий, по всей технологической схеме, отличалась как по этапам обработки, так и по периодам эксплуатации, что говорит о тенденции к локальному и сезонному развитию микрофлоры. Из проб воды после угольных фильтров и из гранулированного активированного угля (ГАУ) были выделены бактерии, которые восстанавливают хлораты. Культуры продемонстрировали высокую активность восстановления хлора, которая для образцов ГАУ достигала 68,3%, а для бактерий, выделенных из проб воды после угольных фильтров, составила 79,2%. Выделенные микроорганизмы, восстанавливающие кислородные соединения хлора, существенно снижают эффективность обеззараживания воды и дезинфекции оборудования гипохлоритом натрия (NaClO). Определены основные источники контаминации по этапам обработки, которые условно можно разделить на внешние, когда микроорганизмы попадают в систему оборудования установки снаружи с водой, поступающей на очистку, или воздухом, и внутренние - это ячейки, в которых происходит развитие микрофлоры с последующим распространением бактериальных клеток потоком воды, которая очищается. Предложены рекомендации по совершенствованию существующей технологии обеззараживания воды и ограничения нежелательного развития микрофлоры в системе водоочистного оборудования с целью обеспечения нормативных показателей качества очищенной воды по микробиологическим показателям.

Ключевые слова: подготовка питьевой воды, гранулированный активированный уголь (ГАУ), бактерии, биопленка, хлорирование, гипохлорит натрия (NaClO).

ANALYSIS OF THE WORK OF MULTI-STAGE PROCESS PLANT AFTER- TREATMENT OF TAP WATER IN THE EXISTING PRODUCTION AND WAYS OF ITS IMPROVEMENT

I.Y Roi, L.K Patyuk, N.A Klimenko

Institute of Colloid and Water Chemistry named Dumansky NAS , Kiev

e-mail: roy_inka@ukr.net

Studied the microbiological indicators of water treatment plants and identified the technical and technological conditions necessary to ensure compliance with regulatory microbiological quality characteristics of purified tap water for use in the process. It was found that the actual level of microflora, which was observed in the final stage of water treatment, in some cases, have exceeded refers to the set of draft standards, namely 30 CFU / 100sm³. The intensity of the bacteria throughout

the flowsheet, differ in processing steps, and in the period of operation, indicating that the trend towards the development of local and seasonal flora. Since the water samples after charcoal filters and granular activated carbon (GAC) were isolated bacteria which reduce chlorates. Culture showed high activity recovery of chlorine, which samples GAC reached 68.3%, while for bacteria isolated from water samples after a carbon filter, was 79.2%. Isolated microorganisms, reducing the oxygen compounds of chlorine, substantially reduce the effectiveness of water disinfection and disinfection equipment with sodium hypochlorite (NaClO). Identified the main sources of contamination of processing steps which can be divided into external, when microorganisms get into system equipment installation outside water entering the purification or air, and internal - is the cell, which is the development of microflora with subsequent spread of bacterial cells water flow. Offered recommendations to improve the existing water disinfection technology, and restrict unwanted growth of microflora in the system of water purification equipment to ensure regulatory quality indicators of purified water for microbiological parameters.

Key words: potable water, granulated activated carbon (GAC), bacteria, biofilm, chlorination, sodium hypochlorite (NaClO).

Список літератури

1. ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». Затверджені наказом МОЗ України від 12.05.2010 № 400, зареєстровано в Мін'юсті України наказом від 01.07.2010 за № 452/17747.
2. ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості».
3. Директива Ради Європейського Союзу 98/83/ЄС від 3 листопада 1998 р. по якості води, призначеної для вживання людиною.
4. Sibille, I., Mathieu, L., Paquin, J.L. Microbial characteristics of a distribution system fed with nanofiltered water // *Water Research*. – 1997. – V. 31. – P. 2318 -2326.
5. Liu, G., Lut, M.C, Verberk, J.Q., Van Dijk, J.C. A comparison of additional treatment processes to limit particle accumulation and microbial growth during drinking water distribution // *Water Research*. – 2013. - V. 47. - P. 2719 - 2728.
6. Zhang, H., Andrews, S.A. Catalysis of copper corrosion products on chlorine decay and HAA formation in simulated distribution systems // *Water Research*. – 2012. V. 46. – P. 2665-2673.
7. Wang, H., Hu, C., Hu, X., Yang, M., Qu, J.H. Effects of disinfectants 603 and biofilm on the corrosion of cast iron pipes in a reclaimed water distribution system // *Water Research*. – 2012. - V. 46. – P. 1070- 1078.
8. Hallam, N.B., Westy, J.R., Forster, C.F., Powell, J.C., Spencer, I. The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems // *Water Research*. – 2002. - V. 36. – P. 3479-3488.
9. Lethola, M.J., Miettinen, I.T., Lampola, T., Hirvonen, A., Vartiainen, T., Martikainen, P.J. Pipeline materials modify the effectiveness of disinfectants in drinking water distributions systems // *Water Research*. – 2005. - V. 39. – P. 1962-1971.
10. Hubbard H.C. Chlorine dioxide reactions with indoor materials during building disinfection: surface uptake // *Environ. Sci. Technol.* – 2009. - V. 43. – P. 1329-1335.
11. Xue, Z., Sendamangalam, V.R., Gruden, C.L., Seo, Y. Multiple role of extracellular polymeric substances on resistance of biofilm and detached clusters // *Environ. Sci. Technol.* – 2012. - V. 46. – P. 13212- 13219.
12. Mathieu, L., Bouteleux, C., Fass, S., Angel, E., Block, J.-C. Reversible shift in the α -, β - and γ - proteobacteria populations of drinking water biofilms during discontinuous chlorination // *Water Research*. – 2009. - V. 43. – P. 3375-3386.
13. Towler, B.W., Rupp, C.J., Cunningham, A.B., Stoodley, P. Visco-elastic properties of a mixed culture biofilm from rheometer creep analysis // *Biofouling*. – 2003. - V. 19. – P. 279 - 285.
14. Abe, Y., Polyakov, P., Skali-Lami, S., Francius, G. Elasticity and physico-chemical properties during drinking water biofilm formation // *Biofouling*. –2011. – V. 27. – P. 739 -750.

15. Abe, Y., Skali-Lami, S., Block, J.-C., Francius, G. Cohesiveness and hydrodynamic properties of young drinking water biofilms // *Water Research*. – 2012. - V. 46. – P. 1155-1166.
16. Jones, W.L., Sutton, M.P., McKittrick, L., Stewart, P.S. Chemical and antimicrobial treatments change the viscoelastic properties of bacterial biofilms // *Biofouling*. – 2011. - V. 27. – P. 207-215.
17. Paul, E., Ochoa, J.C., Pechaud, Y., Liu, Y., Line, A. Effect of shear stress and growth conditions on detachment and physical properties of biofilms // *Water research*. – 2012. - V. 46. – P. 5499–5508.
18. Chen, X., Stewart, P.S. Role of electrostatic interactions in cohesion of bacterial biofilms // *Appl. Environ. Microbiol.* – 2002. - V. 59. – P. 718-720.
19. Flemming, HC, Wingender, J. The biofilm matrix // *Nat. Rev. Microbiol.* – 2010. - V. 8. - P. 623– 633.
20. Aldeek, F., Schneider, R., Fontaine-Aupart, M. Patterned hydrophobic domains in the exopolymer matrix of *Shewanella oneidensis* MR- 1 biofilms // *Appl. Environ. Microbiol* - 2013. - V. 79. P. 1400 - 1402.
21. Mah, T.F., O'Toole, G.A. Mechanisms of biofilm resistance to antimicrobial agents // *Trends in Microbiology*. - 2001. - V. 9. – P. 34-39.
22. Xue, Z., Sendamangalam, V.R., Gruden, C.L., Seo, Y. Multiple role of extracellular polymeric substances on resistance of biofilm and detached clusters // *Environ. Sci. Technol.* – 2012. - V. 46. – P. 13212-13219.
23. Xavier, J.B., Picioreanu, C., Rani, S.A. Biofilm-control strategies based on enzymic disruption of the extracellular polymeric substance matrix – a modelling study // *Microbiology*. – 2005. - V. 151. – P. 3817–3832.
24. Jones, W.L., Sutton, M.P., McKittrick, L., Stewart, P.S. Chemical and antimicrobial treatments change the viscoelastic properties of bacterial biofilms // *Biofouling*. – 2011. - V. 27. – P. 207-215.
- [25] Lieleg, O., Caldara, M., Baumgartel, R., Ribbeck, K. Mechanical robustness of *Pseudomonas aeruginosa* biofilms // *Soft matter*. - 2011. - V. 7. – P. 3307-3314.
26. Davison, W.M., Pitts, B., Stewart, P.S. Spatial and temporal patterns of biocide action against *Staphylococcus epidermitis* biofilms // *Antimicrob. Agents Chemother.* – 2011.- V. 54. P. 2920-2927.
27. Tachikawa, M., Yamanaka, K., Nakamuro, K. Studies on the disinfection and removal of biofilms by ozone water using an artificial microbial biofilm system // *Ozone: Science & Engineering*. – 2009. - V. 31. P. 3-9.
28. Kasuga, I., Shimazaki, D., Kunikane, S. Influence of backwashing on the microbial community in a biofilm developed on biological activated carbon used in a drinking water treatment plant // *Water Sci. Technol.* – 2007. - V. 55. – P. 173 - 180.
29. Huang, W.J., Chen, L.Y. Assessing the effectiveness of ozonation followed by GAC filtration in removing bromate and assimilable organic carbon // *Environ. Technol.* – 2004. - V. 25. – P. 403 - 412.
30. Velten, S., Boller, M., Koster, O. Development of biomass in a drinking water granular active carbon (GAC) filter // *Water Res.* – 2011. - V. 45. – P. 6347 - 6354.
31. Emelko, M.B., Huck, P.M., Coffey, B.M., Smith, E.F. Effects of media, backwash, and temperature on full-scale biological filtration // *J. Am. Water Works Assoc.* – 2006. - V. 98. – P. 61 - 73.
32. Laurent, P., Kihn, A., Andersson, A., Servais, P. Impact of backwashing on nitrification in the biological activated carbon filters used in drinking water treatment // *Environ. Technol.* – 2003. – V. 24. P. 277 - 287.
33. Putz, A.R.H., Losh, D.E., Speitel, G.E. Removal of nonbiodegradable chemicals from mixtures during granular activated carbon bioregeneration // *J. Environ. Eng.* – 2005. - V. 131. – P. 196 - 205.

34. Moll, D.M., Summers, R.S., Fonseca, A.C., Matheis, W. Impact of temperature on drinking water biofilter performance and microbial community structure // *Environ.Sci. Technol.* – 1999. - V. 33. – P. 2377 - 2382.
35. Zhu, I.X., Getting, T., Bruce, D. Review of biologically active filters in drinking water applications // *J. Am. Water Works Assoc.* – 2010. - V. 102. – P. 67 - 77.
36. Zheng, L., Gao, N., Deng, Y., Du, E., Sui, M., Liu, S. The effect of backwashing in the structure of microbial community on biological activated carbon (BAC) in a water treatment plant // *Fresen. Environ. Bull.* – 2011. - V. 20. – P. 1741 - 1748.
37. Gibert O., Lefevre B., Fernandez M. *Characterising biofilm development on granular activated carbon used for drinking water production* // *Water Res.* - 2013. - V. 47(3). – P.1101-1110.
38. Berber V.B., Gomes B.P. In vitro antimicrobial activity of sodium hypochlorite and chlorhexidine against selected single-species biofilms // *Int. Endod. J.* – 2006. – V. 39 (11). – P. 878 –885.
39. Смирнова Т. А., Диденко Л. В., Азизбеян Р. Р., Романова Ю. М. Структурно – функціональна характеристика бактеріальних біопленок // *Мікробіологія.* 2010. Т. 79. № 4. С. 435 – 446.
40. МВ 10.2.1–113–2005 Санітарно-мікробіологічний контроль якості питної води. – К. : Міністерство охорони здоров'я України, 2005.
41. Санитарно-микробиологический анализ питьевой воды. Методические указания: МУК 4.2.10.18-01. – Москва, 2001.
42. *Петрашень В.И.* Объемный анализ – М.: Гостхимиздат, 1946. – 227 с.
43. *Поздеев О. К.* Медицинская микробиология / Под ред. В. И. Покровского. – 2-е изд., испр. – М.: ГЭОТАР-МЕД, 2004. – С. 267 – 268.
44. Жвирблянская А. Ю. Микробиологический контроль производства пива и безалкогольных напитков. М. – 1970.
45. Врюкалова Л.Т., Дудка Г.И., Тимченко О.В., Бережная И.Д. Гигиеническая оценка содержания хлорорганических соединений (хлороформа) в питьевой воде // *Запорожский медицинский журнал.* – 2012. - № 1(70). – С. 81 – 82.
46. LeChevallier M.W., Saawthon C.D., Lee R.G. Factor promoting survival of bacteria in chlorinated water supplies // *Appl. Environ. Microbiol.* – 1988. – V. 54(3). – P. 649 – 654.
47. LeChevallier M.W., Saawthon C.D., Lee R.G. Inaction of biofilm bacteria // *Appl. Environ. Microbiol.* – 1988. – V. 54(12). – P. 2492 – 2499.
48. Мокиенко А.В., Петренко Н.Ф., Гоженко А.И. Адаптивная мультирезистентность бактерий: вклад в эволюцию эпидемического процесса // *Профілактична медицина.* – 2011. – № 2 (14). – С. 90 – 95.
49. Інструкція із застосування дезінфекційного засобу «Реагент комплексної дії "Акватон-10" для знезараження води і об'єктів водопідготовки при децентралізованому та автономному водозабезпеченні // Київ. – 2013.