

FTAMP 61.01.77 : 70.85.29

Ш.М. Умбетова¹ – негізгі автор, ©
У. Умбетов², Г.Б. Курманбаев³,
З.А. Баймаханова⁴, Ж.С. Асанова⁵



^{1,3,4}Техн. ғылым. канд., ²Техн. ғылым. д-ры, профессор, ⁵Магистр

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0001-7716-9822> ²<https://orcid.org/0000-0001-6931-7944>

³<https://orcid.org/0009-0002-0683-9926> ⁴<https://orcid.org/0009-0008-1949-2275>

⁵<https://orcid.org/0000-0003-4456-9891>



^{1,4,5}Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан

²Болашақ университеті, Қызылорда, Қазақстан

³Қызылорда Ашық университеті, Қызылорда, Қазақстан



¹umbetova-37@mail.ru

<https://doi.org/10.55956/GHDV3095>

СУДЫ ОЗОНДАУ КЕЗІНДЕГІ БРОМАТТАРДЫҢ ТҮЗІЛУІ ЖӘНЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕГІ БАСҚАРУ

Аңдатпа. Бұл мақалада суды озондау процесінде броматтардың түзілу механизмі қарастырылды және олардың түзілу кинетикасы зерттелді. Озондау кезінде рН деңгейі, температура, озон дозасы және байланысу уақыты сияқты негізгі факторлардың әсері анықталды. Броматтардың түзілуін азайтуға бағытталған әдістер қарастырылды, олардың ішінде рН-ты төмендету, реагенттер қосу және көпсатылы озондау тәсілдері тиімділігімен ерекшеленді. Сонымен қатар, жасанды интеллект негізіндегі интеллектуалды басқару жүйесі әзірленді. Бұл жүйе судың сапасын нақты уақыт режимінде талдап, броматтардың түзілуін болжауға және озондау параметрлерін автоматты түрде оңтайландыруға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер Арал теңізі аймағына тән тұрақсыз су сапасы жағдайында технологияның тиімділігі мен сенімділігін арттыруға бағытталған.

Тірек сөздер: суды озондау, броматтар, кинетика, жасанды интеллект, зияткерлік жүйе, су тазарту.



Умбетова, Ш.М. Суды озондау кезіндегі броматтардың түзілуі және жасанды интеллект негізіндегі басқару [Мәтін] / Ш.М. Умбетова, У. Умбетов, Г.Б. Курманбаев, З.А. Баймаханова, Ж.С. Асанова // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2025. – №4(90). – Б.337-343. <https://doi.org/10.55956/GHDV3095>

Кіріспе. Халықты сапалы ауыз сумен қамтамасыз ету – тұрақты дамудың басым бағыттарының бірі болып табылады. Климаттың жаһандық өзгеруі, антропогендік жүктеменің артуы және тұщы су тапшылығы жағдайында, әсіресе Арал теңізі бассейні сияқты осал аймақтарда, тиімді әрі қауіпсіз су тазарту технологияларын енгізу қажеттілігі артып келеді.

Суды озондау – орталықтандырылған және жергілікті сумен жабдықтау жүйелерінде кеңінен қолданылатын, болашағы зор әдістердің бірі. Озонның тотығу қабілеті жоғары болғандықтан, ол патогенді микроағзаларды тиімді түрде жояды, органикалық ластағыштарды ыдыратады және жағымсыз иістерді жояды. Алайда, айқын артықшылықтарына қарамастан, озондау әдісінің бірқатар шектеулері де бар. Соның бірі – суда бромид иондары (Br⁻)

болған жағдайда броматтардың (BrO_3^-) түзілуі [1,2]. Броматтар – ықтимал канцерогенді заттар ретінде жіктеледі және халықаралық ауыз су сапасы стандарттарына сәйкес қатаң бақылауға алынады.

Броматтардың түзілу процесі – көптеген факторларға тәуелді күрделі реакциялар тізбегі болып табылады: орта рН-ы, температура, бромидтердің концентрациясы, озон дозасы, жанасу уақыты және органикалық заттардың болуы. Бұл процесті тиімді басқару үшін оның кинетикасын түсініп қана қоймай, өзгермелі жағдайларға бейімделе алатын икемді реттеу жүйелері қажет [3].

Осы тұрғыда жасанды интеллект (ЖИ) негізіндегі зияткерлік басқару жүйелерін қолдану ерекше өзектілікке ие. Мұндай жүйелер су параметрлерін нақты уақыт режимінде талдауға, зиянды қосылыстардың түзілуін болжауға және озондау режимін автоматты түрде түзетуге мүмкіндік береді [4,5]. Бұл, әсіресе, Арал теңізі аймағына тән тұрақсыз су сапасы жағдайында аса маңызды.

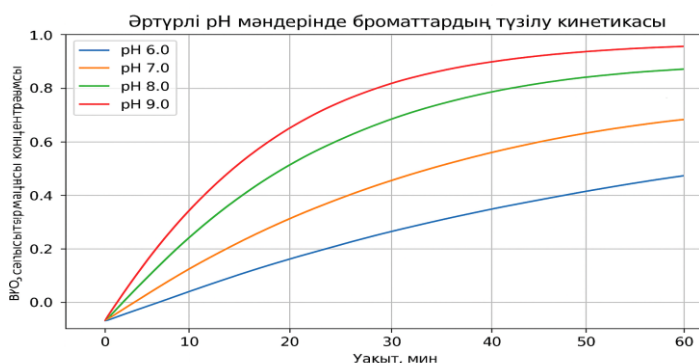
Зерттеу шарттары мен әдістері. Зерттеу Арал теңізі аймағының табиғи су құрамын имитациялайтын модельдік су ерітінділерін пайдалана отырып, зертханалық жағдайда жүргізілді. Негізгі назар бромидтердің концентрациясын, орта рН-ын, температураны және озон дозасын өзгертуге аударылды.

Вариация параметрлері:

- бромидтер концентрациясы (Br^-): 0,05-тен 1,0 мг/л дейін;
- орта рН: 6,0-ден 9,0 дейін;
- температура: 10-нан 30°C дейін;
- озон дозасы: 1-ден 5 мг/л дейін;
- байланысу уақыты: 60 минутқа дейін.

Ерітінділер деионданған су негізінде дайындалды, табиғи бромид құрамын имитациялау үшін натрий хлориді (NaBr) қосылды. рН мәндері тұз қышқылы (HCl) және натрий гидроксиді (NaOH) ерітінділері арқылы реттелді. Озондау озон шығынын және әсер ету уақытын дәл реттеуге мүмкіндік беретін зертханалық озонатор көмегімен жүргізілді.

Броматтар концентрациясын өлшеу иондық хроматография әдісімен жүзеге асырылды. 1-суретте әртүрлі рН мәндерінде озондау уақытына байланысты броматтардың (BrO_3^-) салыстырмалы концентрациясының тәуелділігі көрсетілген.



Сурет 1. Эртүрлі рН мәндерінде броматтардың түзілуінің кинетикалық қисығы

Графиктен көрініп тұрғандай, рН мәні артқан сайын броматтардың түзілу жылдамдығы жоғарылайды. рН 9,0 кезінде BrO_3^- ең қарқынды жиналуы байқалады, ал рН 6,0 кезінде броматтардың түзілуі ең төмен деңгейде болады. Бұл суды озондау кезінде зиянды жанама өнімдердің түзілуін азайту үшін орта рН-ын бақылаудың маңыздылығын дәлелдейді.

Суды озондау кезінде броматтардың түзілу процесін сандық сипаттау үшін псевдобірінші және псевдоекінші ретті модельдер қолданылды. Бұл модельдер реакция кинетикасын уақыт пен реагенттер концентрациясына байланысты сипаттауға мүмкіндік береді. Модельдер негізгі параметрлерді (рН, бромид концентрациясы, температура, озон дозасы және байланысу уақыты) өзгерту арқылы алынған эксперименттік деректер негізінде таңдалды.

Псевдобірінші ретті модель бромидтердің төмен концентрациясы және реакция уақыты шектеулі жағдайларда қолданылды, мұнда броматтардың түзілу жылдамдығы реагенттердің бірінің концентрациясына пропорционалды болады. Ал псевдоекінші ретті модель жоғары концентрациялар мен озон дозалары кезінде реакция жылдамдығының концентрацияға тәуелділігі сызықтық емес болғанда қолданылды.

Дәл талдау үшін дифференциалдық теңдеулерді шешудің сандық әдістері қолданылды, олар бірнеше факторлардың өзара әсерін бір уақытта ескеруге мүмкіндік береді. Есептеулер Python (SciPy, NumPy) және MATLAB бағдарламалық құралдарын пайдалану арқылы жүргізілді, бұл кинетикалық қисықтарды құруға және реакция параметрлерін (жылдамдық константалары, жартылай ыдырау кезеңдері және т.б.) анықтауға мүмкіндік берді [6,7].

Алынған модельдер нақты уақыт режимінде бромат концентрациясын болжау және озондау параметрлерін оңтайландыру үшін кинетикалық деректерді пайдаланатын ЖИ-модульдің негізін қалады.

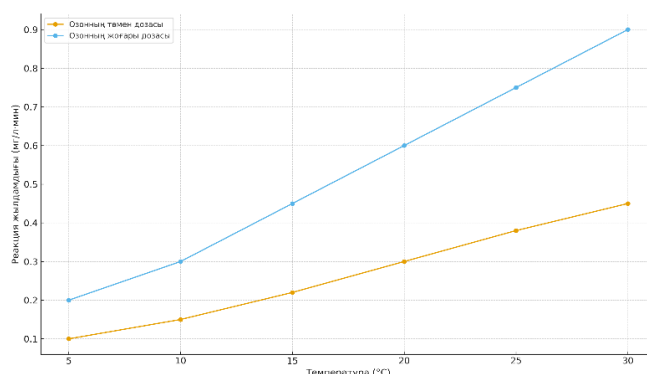
Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. Зертханалық тәжірибелер мен математикалық модельдеу негізінде суды озондау кезінде броматтардың түзілу механизмдерін тереңірек түсінуге мүмкіндік беретін деректер алынды. Бұл сондай-ақ олардың түзілуін азайтудың әртүрлі тәсілдерінің тиімділігін бағалауға мүмкіндік берді. Төменде зерттеу барысында жасалған негізгі бақылаулар мен қорытындылар келтірілген.

Эксперименттік деректерді талдау броматтардың түзілу қарқындылығы озондау жағдайларына тікелей байланысты екенін растады. Реакцияны жеделдетуге ықпал ететін ең маңызды факторлар – рН деңгейінің жоғарылауы, температураның көтерілуі, озон дозасының артуы және ұзақ уақыттық контакт. рН 8-ден жоғары болғанда BrO_3^- иондарының түзілу жылдамдығы күрт артады, бұл озонның сілтілі ортада тотығу белсенділігінің күшеюімен байланысты.

1-суретте әртүрлі рН мәндерінде броматтардың түзілу кинетикалық қисықтары көрсетілген. рН 9,0 кезінде броматтардың түзілуі рН 6,0-ге қарағанда әлдеқайда жылдам жүретіні көрінеді, бұл озондау процесінде ортаның қышқылдығын бақылаудың маңыздылығын көрсетеді.

Температураның көтерілуі кинетикалық процестерді жеделдетіп, озон мен бромидтердің өзара әрекеттесу жылдамдығын арттырады. Озон дозасы артқан сайын бромидтердің броматтарға дейін тотығу ықтималдығы жоғарылайды.

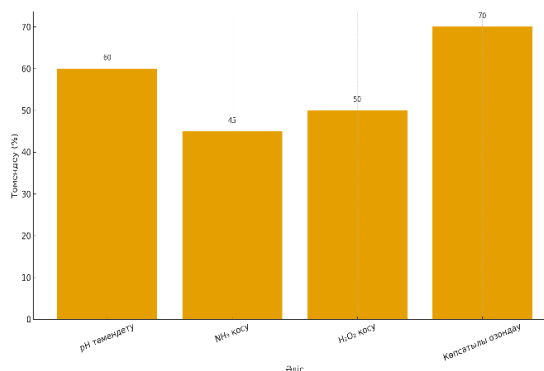
2-суретте төмен және жоғары озон дозасында реакция жылдамдығының температураға тәуелділігі көрсетілген. 30°C кезінде броматтардың түзілу жылдамдығы 10°C-пен салыстырғанда екі есеге жуық жоғары.



Сурет 2. Температураның броматтардың түзілу жылдамдығына әсері

Анықталған заңдылықтарды талдау негізінде броматтардың түзілуін төмендетудің әртүрлі тәсілдері сыналды. Ең тиімді әдістер – реакция жағдайларын өзгерту: рН деңгейін 6,0-6,5 аралығына дейін төмендету, реагенттерді (аммиак, сутек асқын тотығы) қосу, сондай-ақ көпсатылы озондау.

3-суретте осы әдістердің салыстырмалы тиімділігі көрсетілген. Көпсатылы озондау броматтардың концентрациясын 70%-ға дейін төмендетеді, ал аммиак қосу шамамен 45%-ға төмендетеді.



Сурет 3. Броматтардың түзілуін азайту әдістерінің салыстырмалы тиімділігі

Зерттеу аясында әзірленген машиналық оқыту алгоритмдеріне негізделген озондауды басқарудың зияткерлік жүйесі су сапасының өзгермелі жағдайында жоғары тиімділікті көрсетті. Эксперименттік деректер бойынша оқытылған жасанды интеллект моделі бромат концентрациясын болжауда 90 пайыздан жоғары дәлдік көрсетті. Жүйе дәстүрлі басқару әдістерімен салыстырғанда броматтардың түзілуін 30-50 пайызға төмендетуге мүмкіндік берді [8,9]. Ол судың ағымдағы сипаттамаларына байланысты озон дозасын, рН деңгейін және байланысу уақытын автоматты түрде реттеді. Бұл нақты уақыт режимінде процестің тұрақтылығын және қауіпсіздігін қамтамасыз етті, сондай-ақ операторға түсетін жүктемені азайтты.

Осылайша, су тазарту жүйесіне ЖИ интеграциялау тиімділікті арттырып қана қоймай, Арал теңізі аймағына тән тұрақсыз су сапасы жағдайында технологияның тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

Қорытынды. Зертханалық эксперименттер мен математикалық модельдеу негізінде суды озондау кезінде броматтардың түзілу механизмдерін тереңірек түсінуге мүмкіндік беретін деректер алынды. Бұл олардың түзілуін азайтуға бағытталған түрлі тәсілдердің тиімділігін бағалауға да мүмкіндік берді. Төменде ұсынылған нәтижелер зерттеу барысында жасалған негізгі бақылаулар мен қорытындыларды көрсетеді.

Эксперименттік деректерді талдау броматтардың түзілу қарқындылығы озондау жағдайларына тікелей тәуелді екенін растады. Реакцияны жеделдететін ең маңызды факторлар – рН-тың жоғарылауы, температураның көтерілуі, озон дозасының артуы және ұзақ байланысу уақыты. Мысалы, рН 8-ден жоғары болғанда BrO_3^- иондарының түзілу жылдамдығы күрт өседі, бұл озонның сілтілі ортада тотығу белсенділігінің артуымен байланысты. Температураның жоғарылауы кинетикалық процестерді жеделдетіп, озон мен бромидтердің өзара әрекеттесу жылдамдығын арттырады. Озон дозасының көбеюі бромидтердің броматтарға дейін тотығу ықтималдығын арттырады, ал озонның ұзақ әсер етуі соңғы тотығу өнімдерінің жиналуына ықпал етеді. Алынған кинетикалық қисықтар (1-сурет) рН 9,0 кезінде броматтардың түзілуі рН 6,0-ге қарағанда әлдеқайда жылдам жүретінін айқын көрсетеді. Бұл озондау процесінде ортаның қышқылдығын бақылаудың маңыздылығын дәлелдейді.

Анықталған заңдылықтарды ескере отырып, броматтардың түзілуін төмендетуге бағытталған түрлі тәсілдер сыналды. Ең тиімді әдістер реакция жағдайларын өзгертуге бағытталған болды. рН-ты 6,0-6,5 диапазонына дейін төмендету броматтардың түзілуін айтарлықтай баяулатады, себебі қышқыл ортада озон бромидтермен әлдеқайда аз әрекеттеседі. Аммиак немесе сутек асқын тотығы сияқты реагенттерді қосу бромның аралық формаларын қалпына келтіруге және олардың броматтарға айналуына жол бермеуге ықпал етеді. Сонымен қатар, аралық сүзгілеумен көпсатылы озондау аралық өнімдерді тиімді жоюға және зиянды қосылыстардың жалпы жиналуын төмендетуге мүмкіндік береді. Бұл әдістерді су көзінің нақты сипаттамаларына бейімдеуге және автоматтандырылған басқару жүйелеріне интеграциялауға болады.

Процестің тиімділігі мен сенімділігін арттыру үшін машиналық оқыту алгоритмдеріне негізделген озондауды басқарудың зияткерлік жүйесі әзірленді. Эксперименттік деректер бойынша оқытылған жасанды интеллект моделі бромат концентрациясын болжауда жоғары дәлдік көрсетті ($R^2 > 0,9$). Жүйе дәстүрлі басқару әдістерімен салыстырғанда броматтардың түзілуін 30-50 пайызға төмендетуге мүмкіндік берді. Ол судың ағымдағы сипаттамаларына байланысты озон дозасын, рН деңгейін және байланысу уақытын автоматты түрде реттеді. Бұл нақты уақыт режимінде процестің тұрақтылығын және қауіпсіздігін қамтамасыз етті, сондай-ақ операторға түсетін жүктемені азайтты.

Осылайша, зерттеу нәтижелері эксперименттік тәсіл, математикалық модельдеу және зияткерлік технологияларды біріктіру броматтардың түзілу процесін тереңірек түсінуге ғана емес, сонымен қатар оларды нақты су тазарту жағдайында тиімді басқаруға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Әдебиеттер тізімі

1. Яншина, М.С. Озонирование воды [Текст] / М. С. Яншина // Гигиена и санитария. – 1946. – №5. – С. 6-10.

2. Леванов, А.В. Кинетика и механизм взаимодействия озона с хлорид-ионами [Текст] / А.В. Леванов, О.Я. Исайкина, В.В. Лунин // Физикалық химия журналы. – 2019. – Т. 93. – № 9. – С. 1328-1337.
3. Курбатов, А.Ю. О перспективности использования озона в процессах децентрализованного обеззараживания и обезжелезивания артезианских вод [Текст] / А.Ю. Курбатов, Е.Н. Кузин, Ю.М. Аверина, М.А. Ветрова // Экологиялық технологиялар журналы. – 2020. – Т. 34. – №6 (229). – С. 54-56.
4. Beltrán F.J. et al. Kinetics of ozone decomposition catalyzed by activated carbon in water // Proceedings of the 15th World Ozone Congress, IOA, London, 2001.
5. Баженов, В.И. Роль искусственного интеллекта в предотвращении утечек воды из сетей водоснабжения [Текст] / В.И. Баженов, О.Г. Примин, В.В. Баженов // Строительство: наука и образование. – 2024. – Т. 14. – № 4. – С. 98-111.
6. Duguet J. P. Drinking water disinfection during the 20th century and the future for ozone // IOA World Congress, London, 2001.
7. Марков, К.К. Образование побочных продуктов при озонировании воды / К.К. Марков, А.К. Марков. – Презентация. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: ppt-online.org. (дата обращения: 25.11.2025).
8. Prendiville P. Water treatment process improvement by pre-ozonation: experiences from the USA // IOA World Congress, London, 2001.
9. Lean Center. Artificial intelligence and innovations in water treatment and water supply. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: lean-center.ru.

Зерттеу жұмыстары ҚР ҒЖБМ Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылған АР26199445 «Суды озондау арқылы өңдеудің интеллектуалды жүйесін әзірлеу» жоба аясында орындалды.

Материал редакцияға 30.10.25 түсті, 17.11.25 қабылданды.

**Ш.М. Умбетова¹, У. Умбетов², Г.Б. Құрманбаев³,
З.А. Баймаханова¹, Ж.С. Асанова¹**

¹Кызылординский университет им. Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан

²Университет Болашақ, Кызылорда, Казахстан

³Кызылординский открытый университет, Кызылорда, Казахстан

ОБРАЗОВАНИЕ БРОМАТОВ ПРИ ОЗОНИРОВАНИИ ВОДЫ И УПРАВЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Аннотация. В данной статье рассмотрен механизм образования броматов в процессе озонирования воды и исследована их кинетика. Определено влияние основных факторов, таких как уровень pH, температура, доза озона и время контакта. Рассмотрены методы, направленные на снижение образования броматов, среди которых снижение pH, добавление реагентов и многоступенчатое озонирование показали наибольшую эффективность. Кроме того, разработана интеллектуальная система управления на основе искусственного интеллекта. Эта система позволяет анализировать качество воды в режиме реального времени, прогнозировать образование броматов и автоматически оптимизировать параметры озонирования. Полученные результаты направлены на повышение эффективности и надежности технологии в условиях нестабильного качества воды, характерного для региона Аральского моря.

Ключевые слова: озонирование воды, броматы, кинетика, искусственный интеллект, интеллектуальная система, водоочистка.

Sh.M. Umbetova¹, U. Umbetov², G.B. Kurmanbayev³,
Z.A. Baymakhanova¹, Zh.S. Asanova¹

¹Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan

²Bolashak University, Kyzylorda, Kazakhstan

³Kyzylorda Open University, Kyzylorda, Kazakhstan

FORMATION OF BROMATES DURING WATER OZONATION AND AI-BASED CONTROL

Abstract. This article examines the mechanism of bromate formation during the water ozonation process and investigates their kinetics. The influence of key factors such as pH level, temperature, ozone dose, and contact time has been determined. Methods aimed at reducing bromate formation are discussed, among which lowering pH, adding reagents, and multi-stage ozonation proved to be the most effective. In addition, an intelligent control system based on artificial intelligence was developed. This system enables real-time analysis of water quality, prediction of bromate formation, and automatic optimization of ozonation parameters. The results obtained are aimed at improving the efficiency and reliability of the technology under conditions of unstable water quality typical for the Aral Sea region.

Keywords: water ozonation, bromates, kinetics, artificial intelligence, intelligent system, water purification.

References

1. Yanshina, M.S. Ozonirovanie vody [Ozonation of water] // Hygiene and Sanitation. – 1946. – No. 5. – P. 6-10. [in Russian].
2. Levanov A.V., Isaikina O.Y., Lunin V.V. Kinetika i mekhanizm vzaimodeystviya ozona s khlorid-ionami [Kinetics and mechanism of the interaction of ozone with chloride ions] // Journal of Physical Chemistry. – 2019. – Vol. 93. – No. 9. – P. 1328-1337. [in Russian].
3. Kurbatov A.Y., Kuzin E.N., Averina Y.M., Vetrova M.A. O perspektivnosti ispol'zovaniya ozona v protsessakh detsentralizovannogo obezzarazhivaniya i obezbezpechivaniya arteziyskikh vod [On the prospects of using ozone in decentralized disinfection and deferrization processes of artesian waters] // Journal of Ecological Technologies. – 2020. – Vol. 34. – No. 6 (229). – P. 54-56. [in Russian].
4. Beltrán, F.J. et al. Kinetics of ozone decomposition catalyzed by activated carbon in water // Proceedings of the 15th World Ozone Congress, IOA, London, 2001.
5. Bazhenov V.I., Primin O.G., Bazhenov V.V. Rol' iskusstvennogo intellekta v predotvrashchenii utechek vody iz setey vodosnabzheniya [The role of artificial intelligence in preventing water leaks from water supply networks] // Construction: Science and Education. – 2024. – Vol. 14. – No. 4. – P. 98-111. [in Russian].
6. Duguet, J.P. Drinking water disinfection during the 20th century and the future for ozone // IOA World Congress, London, 2001.
7. Markov K.K., Markov A.K. Obrazovanie pobochnykh produktov pri ozonirovanii vody [Formation of by-products during water ozonation] – Presentation. – [Electronic resource]. – Access mode: ppt-online.org. [in Russian].
8. Prendiville, P. Water treatment process improvement by pre-ozonation: experiences from the USA // IOA World Congress, London, 2001.
9. Lean Center. Artificial intelligence and innovations in water treatment and water supply. – [Electronic resource]. – Access mode: lean-center.ru.