УДК 628.15

Квартенко О. М., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

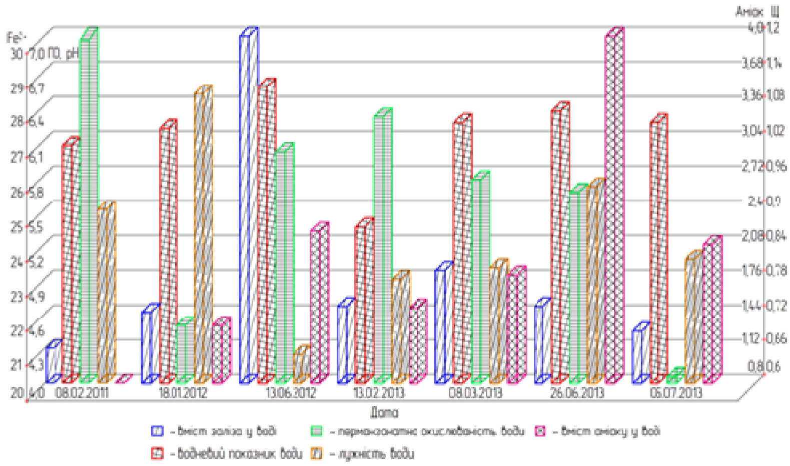
ІНТЕНСИФІКАЦІЯ РОБОТИ СТАНЦІЇ ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ СЛАБКОКИСЛИХ ПІДЗЕМНИХ ВОД З НИЗЬКИМ ЛУЖНИМ РЕЗЕРВОМ

В роботі наведені теоретичні та експериментальні дані щодо інтенсифікації роботи станцій знезалізнення. Встановлено, що в сучасних умовах актуальним завданням є переведення екстенсивних технологій водоочищення в технології, які забезпечують високу швидкість окиснення сполук заліза та азоту амонійного, збільшуючи тривалість фільтроциклу та зменшуючи енерговитрати. Актуальним питанням є проведення стабілізаційної обробки води для запобігання її повторного забруднення продуктами корозії трубопроводів. Запропоновано використання комплексного біофізико-хімічного методу кондиціонування води.
***Ключові слова*: залізобактерії, біореактор, кальцинована сода, біологічне знезалізнення, азот амонійний.**

На сьогодні для 70% сіл та селищ міського типу в Україні підземні води є єдиним джерелом водопостачання [1]. Зі спеціальних методів обробки досить широко використовується знезалізнення за методом спрощеної аерації із подальшим фільтруванням крізь шар фільтруючого матеріалу [2; 3; 4]. Проте, згідно приведених даних досліджень ефективності роботи існуючих станцій знезалізнення, на 80% із них належного ефекту видалення із води сполук заліза не досягається [1]. Таким чином, реконструкція та інтенсифікація роботи діючих станцій знезалізнення для потреб малих населених пунктів є актуальним завданням.

Метою даної роботи є вибір оптимального комплексу методів, для інтенсифікації роботи станції знезалізнення.

В результаті проведеного в період з 2011 по 2013 роки моніторингу якісного складу підземних вод, на яких базується система водопостачання смт Рокитне, було встановлено, що їх можливо класифікувати як слабкокислі (pH=5,5-6,4), м'які (Ж до 4,0 мг екв/дм^3), із дуже низьким лужним резервом (Л=0,6-1,18 мг-екв/дм^3), з підвищеними величинами перманганатної окисності (ПО=6-7 мгO_2/дм^3), сполук заліза (до 30 мг/дм^3), аміаку та сірководню (до 4,0 мг/дм^3). Із часом у водоносному горизонті спостерігалося прогресуюче погіршення якості води за вмістом аміаку (від 0,8 мг/дм^3 у 2011 році до 4,0 мг/дм^3 у 2013 році), коливання вмісту розчинних органічних речовин навпаки мало тенденцію до незначного зменшення від 7 до 4,5 мгO_2/дм^3, але в окремі місяці 2013 року спостерігалася підвищення окиснюваності до 6,0 мгO_2/дм^3, вміст заліза теж коливався за сезонами року (рис. 1). У 2013-2014 роках у підземних горизонтах була зафіксована поява фенолів (до 0,1 мг/дм^3). Таким чином, підземні води одночасно знаходяться під впливом як антропогенних, так і природних забру-



днень, а також схильні до міжсезонних коливань параметрів якості.

Рис. 1. Зміна якості води у смт Рокитне в період з 2011 по 2013 роки

За розрахунковими критеріями стабільності води – індексами Ланжельє та Різнера (I_R=10,5) підземні води свердловин Рокитнянського водозабору є надзвичайно агресивними по відношенню до металу та бетону (рис. 2). При I_R >8,5 відбуваються процеси недопустимого ступеню корозії металу, які призводять до повторного забруднення води продуктами корозії та підвищенню ступеню аварійності водопровідних мереж.

До складу діючої станції знезалізнення в смт Рокитне входять: п'ять напірних фільтрів І ступеню Н=3,8 м, d=1,5 м; два напірних фільтра ІІ ступеню Н=3,0 м, d=1,5 м; насоси ІІ підйому (К100-65-200 – 1 шт; КМ100-65 – 1 шт); насос промивної води (К100-65-200); компресор стисненого повітря РМ-3142.01 в комплекті з двома ресиверами, компресор для подачі стислого повітря для промивки фільтрів. Знезараження води проводиться додаванням хлорного вапна до РЧВ.

При візуальному обстеженні фільтрів та фільтруючого завантаження із кварцового піску було виявлено, що за роки експлуатації вийшов експлуатаційний резерв дренажної системи, виконаної із чорного металу, який підлягає інтенсивній корозії, враховуючи агресивні властивості вхідної води та водоповітряної суміші при промивці фільтрувального завантаження. В результаті чого порушується технологічний режим, що призводить до прогресуючої кольматації фільтрувального завантаження. За час експлуатації технологічні трубопроводи та арматура зазнали корозії, що призводить до незапланованих втрат води.

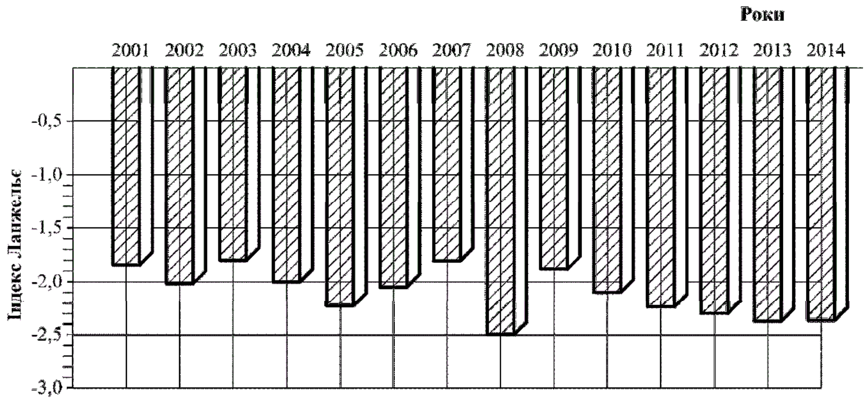


Рис. 2. Зміна параметрів індексів стабільності води у смт Рокитне
в період з 2001 по 2014 роки

В період з 2010 по 2013 роки були проведені дослідження з метою модернізації діючої схеми, обладнання та визначення оптимальних доз реагентів які б дозволили інтенсифікувати роботу станції знезалізнення. На першому етапі дослідження проводилися в напрямку пошуку оптимальних доз лужного реагенту. Параметри вихідної води складали: залізо загальне 22,3 мг/дм^3, лужність 0,78 мг-екв/дм^3, рН 5,8. Для підлуження застосовувався 1% розчин кальцинованої соди. Результати досліджень параметрів якості води після контакту із закріпленою на завантаженні біореактора мікрофлорою наведені на рис. 3.

За результатами досліджень, проведених сумісно з бактеріологічною лабораторією Рівненької обласної СЕС, були встановлені оптимальні параметри лужності для розвитку залізобактерій, які знаходяться в межах 1,8 – 2,0 мг-екв/дм^3 [5, С. 54-55]. При концентрації азот амонійних сполук 2,0 – 4,0 мг/дм^3 рекомендується використовувати підлуження після біореактора перед введенням розчину коагулянту. В цьому випадку величина рН в біореакторі знижується до

5,5–5,7, що дає можливість окиснення азот амонійних сполук до азоту за реакцією Фентона [6, С. 45].

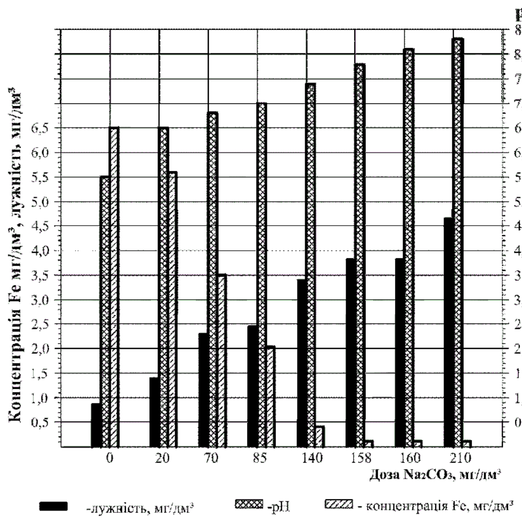


Рис. 3. Зміна параметрів якості води після контакту із закріпленою мікрофлорою в залежності від дози підлужуючого реагенту

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + HO^{\bullet} + OH^{-} \quad (1)$$

$$Fe^{2+} + HO^{\bullet} \rightarrow Fe^{3+} + OH^{-} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &H_2O_2 + HO^{\bullet} \rightarrow HO_2^{\bullet} + H_2O \\ &2NH_4^{+} + 2HO_2^{\bullet} \rightarrow N_2 + 4H_2O + 2H^{+} \end{aligned} \quad (3)$$

За менших концентрацій азот амонійних сполук, для інтенсифікації процесу біологічного знезалізнення, доцільно проводити попереднє підлуження води із дозою кальцинованої соди 20–60 мг/дм^3, підвищуючи величини лужності до 1,5–2,3 мг-екв/дм^3 та pH до 6,5–6,8. Введення перед блоком біореактора розчину кальцинованої соди одночасно нейтралізує частину агресивного діоксиду вуглецю, коригує бікарбонатну лужність, активує окислювальні процеси залізобактерій. В результаті відбувається окиснення органічних речовин з 6,56 мгО$_2$ /дм^3 у вихідній воді до 2,7–2,3 мгО$_2$/дм^3 після фільтрів другого ступеня, азот амонійних сполук з 1,8–2,0 мг/дм^3 у вихідній воді до 0,6–1,0 мг/дм^3 – після біореакторів та до 0,55–0,2 мг/дм^3 після фільтрів другого ступеня [5, С. 56-57]. В цьому випадку механізм очистки від аміаку на біореакторах відбувається наступним чином. При надходженні аміаку в підземні води відбувається його розчинення з подальшим утворенням азоту амонійного:

$$NH_3 + H_2O \leftrightarrow NH_4OH \, , \quad (4)$$

$$NH_4OH \leftrightarrow NH_4^+ + OH^- \, . \quad (5)$$

При надходженні води в біореактор спостерігається концентрування катіонів NH_4^+ навколо клітин залізобактерій в результаті адсорбційних процесів, які відбуваються за рахунок знаходження на їх поверхні від'ємно заряджених груп аніонів: $PO_4^{3-};COO^-;HS^-;OH^-$. Сорбовані таким чином на поверхні чохлів залізобактерій катіони NH_4^+ в подальшому окиснюються продуктами їх внутріклітинного метаболізму $H_2O_2;O^\bullet$:

$$2NH_4^+ + H_2O_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O + 6H^+ \quad (6)$$

$$2NH_4^+ + 3O^\bullet \rightarrow N_2 + 3H_2O + 2H^+ \quad (7)$$

Азот частково виділяється у воду, а частково накопичується в чохлах залізобактерій, що підтверджується спектральним аналізом біологічної плівки з гранул завантаження біореактора (рис. 4).

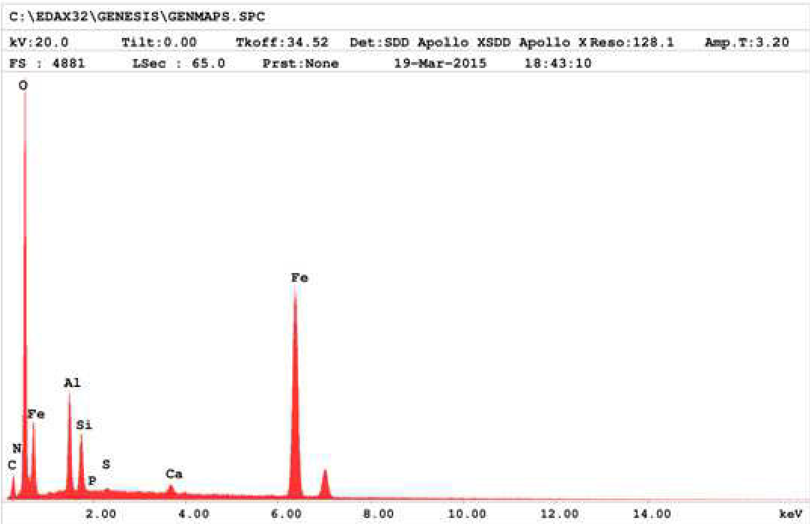
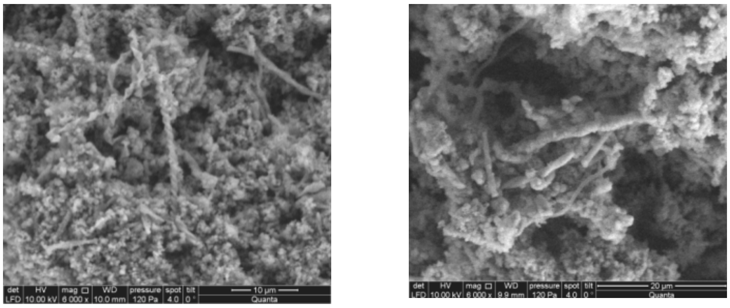


Рис. 4. Рентгеноспектральний мікроаналіз біологічної плівки з гранул завантаження біореактора станції знезалізнення смт Рокитне

Проведений за допомогою растрового електронного мікроскопу Philips серії XL-30 аналіз промивних вод та біоплівки гранул завантаження фільтрів I-го ступеня показав присутність залізобактерій родів *Gallionella* та *Leptothrix* (рис. 5). При використанні доз кальцинованої соди вище за 100 мг/дм^3 pH системи підвищується до 7,5–8,3, що призводить до гальмування процесу біологічного знезалізнення з перевагою хімічного окиснення. В результаті чого, у міжпоровому просторі завантаження біореактора, буде відбуватися зміна структури осаду.



а б

Рис. 5. Електронне зображення структури осаду станції знезалізнення
а – промивних вод від біоректора, 6000 х; б – осаду в міжпоровому просторі фільтруючого завантаження біореактора, 6000 х

Замість біомінералів *FeOOH,* створених в результаті життєдіяльності консорціумів залізобактерій [7], утворюється аморфний пухкий осад гідрооксиду заліза. Різниця не тільки в об'ємі, який він займає, завдяки великій кількості захоплених молекул води і як наслідок швидкому приросту втрат напору та зменшенні тривалості фільтроциклу, але і в структурі, питомій поверхні, адсорбційних властивостях та заряді поверхні [8]. У всіх випадках осад, отриманий завдяки залізобактеріям містить мінімум гідроксиду заліза $Fe(OH)_3$ і в основному складається із лепідокрокіту γ – *FeOOH,* іноді з гетиту α – *FeOOH*. Ці кристалічні форми більш компактні, ніж аморфний осад із гідрооксиду заліза $Fe(OH)_3$ та феригідриту ($5Fe_2O_3 \bullet 9H_2O$). На другому етапі були проведені пілотні фільтроцикли з метою дослідження ефективності використання коагулянту – оксихлориду алюмінію для доочищення води на фільтрах II ступеню (рис. 6).

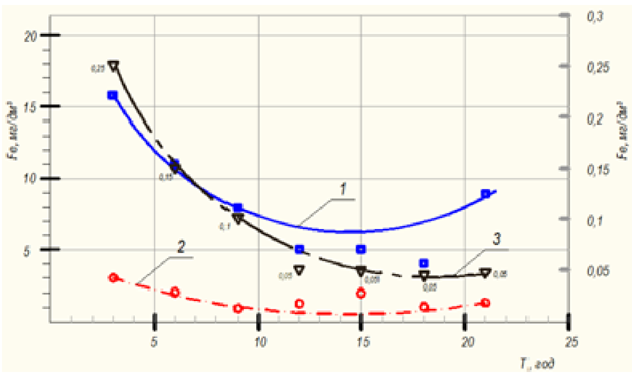


Рис. 6. Результати пілотного фільтроциклу

Як видно з наведених результатів – тривалість фильтроциклу в середньому становила 18–22 години, присутність двовалентного заліза у фільтраті 0,68–2,5 мг/дм^3 в основному у вигляді залізогумінових комплексів (рис. 6, крива 2). При введенні розчину коагулянту спостерігалася дестабілізація колоїдної системи із подальшим розділом фаз на фільтрах II ступеня (рис. 6, крива 3). За результатами досліджень запропоновано технологічну схему (рис. 7), яку було впроваджено в робочий проект реконструкції станції знезалізнення у 2012 році. Технологія захищена патентом України [9].

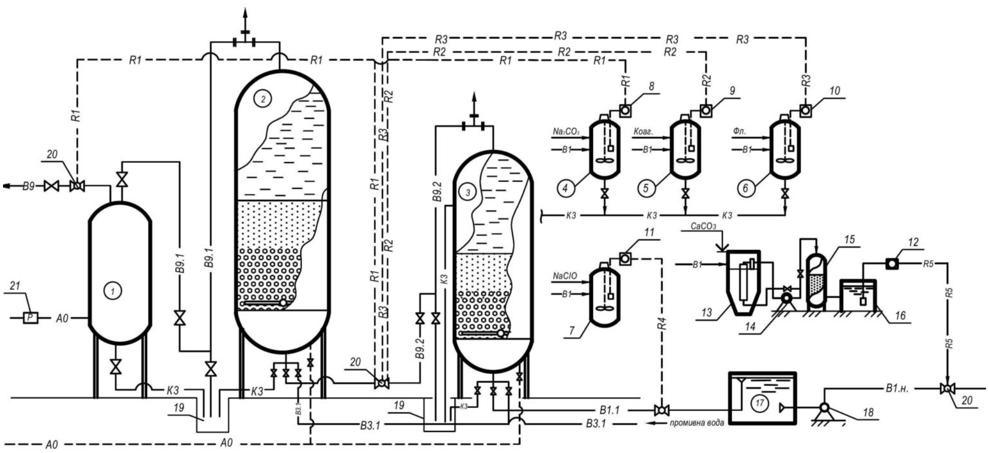


Рис. 7. Технологічна схема кондиціонування підземних вод:
1 – напірний аераційний змішувач; 2 – біореактор; 3 – освітлювальний фільтр; 4, 5, 6, 7 – блоки приготування та дозування розчинів кальцинованої соди, коагулянту, флокулянту, гіпохлориту натрію; 8, 9, 10, 11, 12 – насоси дозатори; 13 – гідравлічний змішувач для приготування вапняного розчину; 14 – циркуляційний насос, 15 – фільтр, 16 – витратний бак освітленого вапняного розчину; 17 – РЧВ; 18 –НС II; 19–20 – змішувачі, 21 – ротаметр

Вихідна вода по трубопроводу В9 змішується з лужним реагентом – кальцинованою содою надходить до напірного змішувача – 1 обладнаного дрібнобульбашковим аератором. Витрата повітря, яке надходить до змішувача 1, регулюється за допомогою ротаметру 21 за рахунок чого значення Eh та концентрації розчиненого кисню в системі підтримуються оптимальними для життєдіяльності залізобактерій. Коригування доз та місця введення кальцинованої соди необхідно проводити в залежності від концентрації азот амонійного та лужності природної води в період експлуатації обладнання. Вода із зміненими показниками кисневого режиму, лужності, диоксиду вуглецю, pH – Eh системи надходить до біореактора 2 де відбувається процес фільтрування в низхідному режимі через піщане завантаження із швидкістю 2,5–3 м/год. Тривалість контакту води, що обробляється із каталітичною плівкою залізобактерій складає 50-55 хв. Кристалічні форми біомінералів *(γ – FeOOH, α FeOOH),* які виділяються в процесі життєдіяльності залізобактерій, є природними коагулянтами із високою питомою поверхнею контакту, на якій відбувається сорбція колоїдних частинок залізогумінових комплексів. Використання цього природного коагулянту дозволить на 20-30% знизити витрату оксихлориду алюмінію, який вводиться перед фільтром II ступеню із дозою (Д=10-15 мг/дм^3) та неіногенного флокулянта (Д=1,0-1,5 мг/дм^3). Вода по трубопроводу В 9.2 направляється на фільтри II ступеню 3. В надфільтровому просторі фільтрів відбувається процес коагуляції із подальшим розділом фаз в піщаному завантаженні. Тривалість контакту води із піщаним завантаженням становить 20-25 хвилин. Фільтрат проходить через вузол стабілізаційної обробки води (13-16), знезаражується розчином гіпохлорита натрію та відводиться до РЧВ 17. Промивка фільтрів – повітряно-водяна. Подача повітря на фільтри здійснюється по трубопроводу (АО) діаметром 80 мм. Подача промивної води – по трубопроводу В3.1 від промивних насосів. Інтенсивність подачі води 18 л/с·м^2.

Скид відпрацьованих промивних вод відбувається по технологічному трубопроводу К3 в існуючий збірний канал, звідки відводиться за межі станції. Вузол стабілізаційної обробки води призначено для захисту водопровідних труб та обладнання від корозії. В якості лужного реагенту використовується кальцинована сода або гашене вапно.

Висновки. За результатами досліджень встановлено, що підземні води смт Рокитне надзвичайно агресивні до металу, містять значні концентрації сполук заліза, азот амонійного, залізобактерій. Запропоновано інтенсифікувати роботу діючої станції шляхом переобладнання її із стандартної технології знезалізнення до технології біологічного знезалізнення із одночасним видаленням азот амонійного. Встановлені оптимальні параметри бікарбонатної лужності для розвитку залізобактерій, а також доз лужного реагенту – кальцинованої соди, необхідного для її коригування. В залежності від концентрацій азот амонійних сполук визначені оптимальні точки введення кальцинованої соди. Наведені механізми окиснення азоту амонійного в біореакторі. Встановлені суттєві від'ємності структури чохлів залізобактерій від аморфного осаду гідрооксиду заліза, який утворюється при звичайному окиснені заліза киснем повітря. Розроблена та впроваджена в робочий проект технологічна схема кондиціонування підземних вод з блоком стабілізаційної обробки.

Автор висловлює вдячність проф. Говоровій Ж.М. за надану допомогу у проведенні рентгеноспектрального мікроаналізу біологічної плівки завантаження біореактора.

1. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2003 році. – Рівне : НУВГП, 2005. – 142 с. **2.** Николадзе Г. И. Обезжелезивание природных и оборотных вод/ Николадзе Г. И. – М. : Стройиздат, 1978. – 160 с. **3.** Знезалізнення підземних вод для питних цілей: [Монографія під загальною редакцією В. О. Орлова] / В. О. Орлов, О. М. Квартенко, С. Ю. Мартинов, Ю. І. Гордієнко. – Рівне : 2004. – 153 с. **4.** Орлов В. О. Знезалізнення підземних вод спрощеною аерацією та фільтруванням [Монографія] / В. О. Орлов. – Рівне : 2008. – 158 с. **5.** Квартенко А. Н. Технология кондиционирования агрессивных подземных вод с низким щелочным резервом, содержащих аммиак и железоорганические комплексы / А. Н. Квартенко // Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури. Збірник наукових праць. – Макіївка, 2013. – Вип. 5 (103). – С. 52–60. **6.** Квартенко О. М. Дослідження методів очищення підземних залізомістних вод від амонійних сполук та аміаку [Текст] / О. М. Квартенко, Л. А. Саблій // Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті. – 2016. – № 1(18). – С. 39–49. **7.** Chana Clara S. Iron oxyhydroxide mineralization on microbial extracellular polysaccharides / Clara S. Chana, Sirine C. Fakra, David C. Edwards, David Emerson, Jillian F. Banfield // Geochimica et Cosmochimica Acta 73. – 2009. – P. 3807–3818. **8.** Thamdrup B. Magnetic studies of iron (III) nanoparticles in alginate polymer for drug delivery applications / B. Thamdrup // Advances in microbial ecology. Kluwer Academic IP lenum Publishers, New York. – 2000. – P. 41–84. **9.** Спосіб очищення підземних вод від сполук заліза. Патент на корисну модель № 80341 / О. М. Квартенко. – Бюл. № 10. – 27.05.2013.

Рецензент: д.т.н., професор Ковальчук В. А. (НУВГП)

Kvartenko O. M., Candidate of Engineering, Associate Professor
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

OPERATION OF STATION FOR DEIRONING WEAK ACID UNDERGROUND WATERS WITH LOW ALKALI RESERVE

The paper studies the change of groundwater quality of the water supply system of the town of Rokytno. It is established that the water aggressive to metal and concrete. Water containing elevated

concentrations of iron, ammonia, hydrogen sulfide, iron bacteria. Researched optimal for the development of iron bacteria the values of bicarbonate alkalinity of the water. Conducted studies to determine optimal doses of soda ash, coagulant and flocculant. The optimal entry point of soda depending on the concentration of ammonium nitrogen. Given the mechanisms of purification from ammonium nitrogen with the participation of iron bacteria. The results of X-ray microanalysis biologichesike film bioreactor. Studies with the scanning electron microscope shows the presence and in the bioreactor of iron bacteria of the genera Gallionella and Leptothrix. Shows the difference between the structure of the precipitation obtained by biological and chemical oxidation of iron. Developed and implemented in the working draft of the technological scheme of underground water conditioning unit with stabilization treatment.
***Keywords*: iron bacteria, bioreactor, soda ash, biological iron removal, nitrogen amonini.**

Квартенко А. Н., к.т.н., доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РАБОТЫ СТАНЦИЙ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ СЛАБОКИСЛЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С НИЗКИМ ЩЕЛОЧНЫМ РЕЗЕРВОМ

В работе приведены теоретические и экспериментальные данные по интенсификации работы станции обезжелезивания. Установлено, что в современных условиях актуальной задачей является перевод экстенсивных технологий водо-очистки в технологии, которые обеспечивают высокую скорость окисления соединений железа и азота аммонийного, увеличивая продолжительность фильтроциклов, уменьшая энергозатраты. Актуальным вопросом является проведение стабилизационной обработки воды для предотвращения ее повторного загрязнения продуктами коррозии трубопроводов. Предложено использование комплексного биофизико-химического метода кондиционирования воды.
***Ключевые слова*: железобактерии, биореактор, кальцинированная сода, биологическое обезжелезивания, азот аммонийный.**
