

**Рисунок 1** – Архитектура вероятностной нейронной сети классификации образцов качества воды

Для исследования качества классификации (функциональной эффективности) создали 25 возможных наборов входных параметров, принадлежащим к разным классам (табл. 1).

Вероятностная нейронная сеть верно классифицировала все наборы с четким преимуществом на выходе слоя добавления плотности распределения вероятностей соответствующих образов-победителей (рис. 2).



**Рисунок 2** – Плотности распределение вероятностей при проверке эффективности PNN-сети

Учитывая приемлемые результаты оценки динамики изменения образов вероятностными нейронными сетями, предлагается

применять их перед блоками принятия решений в системах управления комбинированными установками водоочистки (рис. 3).



**Рисунок 3** – Структурная схема использования вероятностной нейронной сети при управлении комбинированными системами водоочистки

При этом данные на PNN-сеть поступают с блоков фильтрации информации (с датчиков качества воды) и формирования образов, например, с использованием самоорганизующихся сетей Кохонена.

**Закключение.** Вероятностные нейронные сети можно использовать для оценки динамики изменения качества воды в комбинированных системах водоочистки, поскольку качество оценки подтверждено результатами моделирования – верно классифицированы все 25 учебных образов.

В системах управления PNN-сети рекомендуется устанавливать перед подсистемой выбора стратегий после блоков фильтрации и адаптивного формирования образов. Для этого необходимо осуществить декомпозицию их архитектуры с последующей программной реализацией.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Донченко, М.И. Очистка растворов от дисперсных примесей методом электрокоагуляции. 2. Осаждение глинистых примесей при переменных гидродинамических режимах, факторный эксперимент / М.И. Донченко, О.Г. Срибная, Ф.И. Гончаров, В.Н. Штета // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – № 22. – С. 57–65.
2. Kohonen, T. Self-Organizing Maps (Third Extended Edition): ISBN 3-540-67921-9 – New York, 2001. – 501 p.
3. Lakhmi, S. Martin Fusion of Neural Networks, Fuzzy Systems and Genetic Algorithms: Industrial Applications / S. Lakhmi, N.M. Jain — CRC Press, CRC Press LLC, 1998.
4. Каллан, Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 516 с.
5. Гареев, А.Ф. Применение вероятностной нейронной сети для задачи классификации текстов / А.Ф. Гареев // Наука и образование. – М.: НиО. – 2004. – № 11. – С. 105–117.

Материал поступил в редакцию 16.05.2018

#### **SHTERA V.M., ZAIETS N.A., PROKOPENYA O.N., LUTSKAIA N.N. The probabilistic neural network in the control problems of the combined water treatment systems**

The shortcomings of the modern systems of the selecting management strategies in times of unforeseen factors and the shortcomings of the current approaches in the management of water treatment plants combined are analyzed. The theoretical foundations of probability theory of the neural networks and Bayesian networks are considered. On the basis of self-organization formed Kohonen network the quality of water, where the control parameters used BOD, pH, concentration of suspended solids and the concentration of nitrate the probabilistic neural network evaluation of dynamics of images is synthesized. It has tested its functional efficiency and confirmed the prospect use. The block diagram of the corresponding control system with integration into it PNN-network described. The direction of the future research is formulated.

УДК 628.162

**Романовский В. И., Клебеко П. А., Романовская Е. В.**

### **ОЧИСТКА ПРОМЫВНЫХ ВОД СТАНЦИЙ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ВОДОПОДГОТОВКИ**

Для хозяйственно-питьевого водоснабжения населения Республики Беларусь в основном используется вода подземных источников. В подземной воде республики наблюдается повышенное содержание железа (рис. 1), а иногда и других соединений, которые

**Романовский В.И.**, к. т. н., старший преподаватель Белорусского государственного технологического университета.

**Романовская Е.В.**, ассистент Белорусского государственного технологического университета.

Беларусь, 220050, г. Минск, ул. Свердлова, 13а.

**Клебеко П.А.**, аспирант РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов».

Беларусь, 220086, г. Минск, ул. Славинского, 1, корпус 2.

ухудшают ее показатели и свойства [1]. Технические нормативно-правовые акты Республики Беларусь регламентируют содержание железа в питьевой воде не более 0,3 мг/л [2].

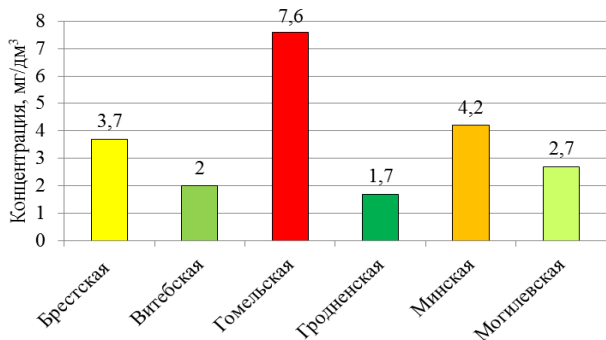


Рисунок 1 – Среднее содержание железа в подземных водах по областям Республики Беларусь, мг/ дм<sup>3</sup>

В Республике Беларусь наиболее распространенным методом обезжелезивания воды является фильтрование через зернистую загрузку с предварительной глубокой либо упрощенной азацией. Регенерация фильтров осуществляется водовоздушной либо водяной промывкой. Доля воды, расходуемой для промывки, может достигать до 10% от общего расхода очищаемой воды. Промывные воды, образующиеся в процессе регенерации, характеризуются высоким содержанием железа, концентрация которого достигает около 500 мг/л [3]. На рисунке 2 представлено содержание железа общего в составе промывных вод в зависимости от времени от начала водо-воздушной промывки фильтров.

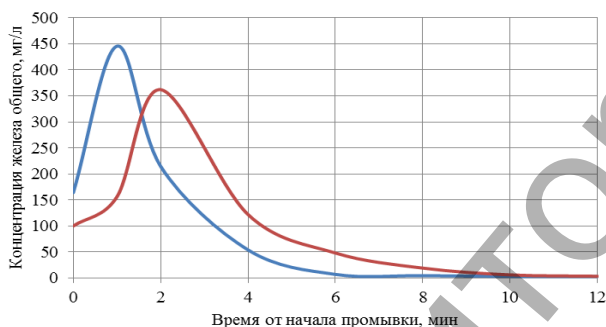


Рисунок 2 – Содержание железа общего в промывной воде при использовании водо-воздушной промывки

Сегодня промывные воды станций обезжелезивания, как у нас в стране, так и за рубежом, в большинстве случаев сбрасываются в водные объекты либо на городские канализационные очистные сооружения. Этот способ применяется как после предварительного отстаивания промывных вод, так и без него. Однако при этом способе происходит значительное загрязнение почвы, поверхностных и подземных вод.

На 20 проанализированных станциях обезжелезивания повторно используется 3% от общего объема промывных вод. Основными приемниками сбрасываемых промывных вод являются (в порядке убывания): городские канализационные сети, поверхностные водные объекты, отстойники промывных вод и мелиоративные каналы.

По истечению рекомендуемого времени отстаивания в статических условиях остаточная концентрация железа в промывной воде остается высокой и составляет около 60 мг/л. Количество осадка влажностью 98–99%, образующегося после двухчасового отстаивания, достигает 3,0–5,0% объема промывных вод [4].

На сегодняшний день существует ряд отходов, которые не используются, но в то же время являются перспективным сырьем для получения коагулянтов. Одним из таких отходов являются отходы отработанных ионообменных смол. Использование их для получения коагулянтов позволит интенсифицировать очистку промывных вод станций обезжелезивания, сэкономить на покупных

коагулянтах, вовлечь в хозяйственный оборот отходы, которые в настоящее время не перерабатываются и вывозятся на захоронение. Все это позволит снизить воздействие на окружающую среду и снизить себестоимость воды.

Цель выполняемых исследований – определить эффективность очистки промывных вод станций обезжелезивания с использованием в качестве коагулянта отработанных ионообменных смол АВ-17 и КУ-2 [5], образующихся в процессе водоподготовки.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- определение режима вода обработанных отходов отработанных ионообменных смол;
- определение эффективности осаждения взвешенных веществ;
- определение эффективности очистки промывных вод по ионам железа;
- определение направления использования уловленного осадка.

Для решения поставленных задач в качестве объектов исследования использованы высококонцентрированные железосодержащие промывные воды станций обезжелезивания.

В работе [6] установлено, что с повышением степени дисперсности изменяется распределение функциональных групп, расположенных на поверхности и в объеме зерна отработанного ионита, в сторону увеличения их концентрации на поверхности. Измельченный до определенной степени дисперсности ионит проявляет свойства, близкие к свойствам полимерных флокулянтов.

Для обоснования выбора коагулянта необходимо знать величину его электрокинетического потенциала (дзетта-потенциала), а также коллоидных частиц Fe(OH)<sub>3</sub> в промывных водах станций обезжелезивания. Дзетта-потенциал коллоидных частиц Fe(OH)<sub>3</sub>, определенный методом электрофореза, составляет около минус 40 мВ, что обуславливает агрегативную устойчивость системы и возникновение межмолекулярных сил отталкивания частиц.

Для сравнения эффективности выбранных коагулянтов были использованы результаты исследований применения сульфата алюминия, коагулянта «Аква-Аурат 30» и коагулирования сульфатом алюминия в присутствии фосфатов [7].

Коллоидные частицы катионита и коагулянтов имеют знак заряда одинаковый с коллоидными примесями Fe(OH)<sub>3</sub>. Коагуляция соединений железа при введении выбранных коагулянтов будет происходить вследствие фиксации (закрепления) соединений железа на сорбционной поверхности коллоидной частицы коагулянта, а не из-за сил межмолекулярного взаимодействия. Однако для более эффективного удаления соединений железа из промывных вод потребуются более высокие дозы перечисленных коагулянтов, что может вызвать перезарядку зольей и в итоге их взаимную коагуляцию.

В работе исследовали реагентную очистку промывных вод станции обезжелезивания с использованием в качестве коагулянта отходов отработанных ионитов АВ-17–8 и КУ-2–8. Значение дзетта-потенциала для предварительно измельченного катионита достигает минус 47,8 мВ, а для анионита – плюс 96,3 мВ [5].

Известно [5], что противоположно заряженные дисперсные частицы измельченных ионитов в результате гетерокоагуляции образуют комплекс. Поэтому представляет интерес использование в качестве коагулянта гетерокоагуляционного комплекса – диспергированные иониты АВ-17–8 и КУ-2–8.

Перед выбором составов проводили опыт по анализу эффективности формирования агрегатов. Для этого они смешивались в соотношении катионит : анионит равным 1 : 1 в воде. После этого отбиралась осветленная вода и оценивалось остаточное содержание взвешенных веществ в растворе по прохождению света при длине волны 300 нм (таблица 1).

Таблица 1 – Эффективность образования агрегатов из отходов отработанных ионообменных смол

Размер фракции, мкм	Катионит КУ-2-8				
	< 63	63–100	100–250	250–500	
Анионит АВ-17-8	63–100	1,056	1,819	2,349	2,394
	100–250	0,6	0,088	0,941	0,841
	250–500	1,733	0,15	1,227	1,347

На основании полученных данных наиболее эффективное вовлечение ионов в образование комплекса происходит при размерах катионита 63–100 мкм и анионита – 100–250 мкм. При этом наиболее рыхлые хлопья образуются при соотношении катионит : анионит равным 1 : 1.

Для исследования эффективности очистки промывных вод станций обезжелезивания использовалась промывная вода станции обезжелезивания водоканала г. Лунинец с концентрацией 326,5 мг/л в пересчете на железо общее.

В качестве коагулянта были использованы предварительно измельченные отходы отработанных ионообменных смол, с содержанием частиц медианным диаметром 63–100 мкм не менее 60%:

- коагулянт № 1 – катионит;
- коагулянт № 2 – катионит и анионит (соотношение 4:1);
- коагулянт № 3 – катионит и анионит (соотношение 2:1);
- коагулянт № 4 – катионит и анионит (соотношение 1:1);
- коагулянт № 5 – катионит и анионит (соотношение 1:2);
- коагулянт № 6 – катионит и анионит (соотношение 1:4);
- коагулянт № 7 – анионит.

Доза коагулянта составляла 1,0, 2,5 и 5 г/л. Исследуемое время отстаивания – 5, 10, 15, 30, 60 и 120 минут.

**Дозирование реагентов.** Дозирование реагентов является ответственным моментом при обработке воды: от его совершенства зависит качество очистки воды и экономичность технологического процесса [8]. В случае применения нескольких видов реагентов очередность их введения в обрабатываемую воду может оказать влияние на эффективность очистки.

Для изучения влияния очередности дозирования реагентов были проведены исследования, результаты которых приведены в таблице 2. Реагенты вводились в обрабатываемую воду одновременно в виде суспензии и в сухом виде, а также и с интервалом. Доза реагентов – 5 г/л. Соотношение катионит : анионит, равное 1 : 1. Проба отбиралась через 30 мин отстаивания. Фильтрование – через слой кварцевого песка 1,0 м. Исходная концентрация железа общего составляла 200 мг/л.

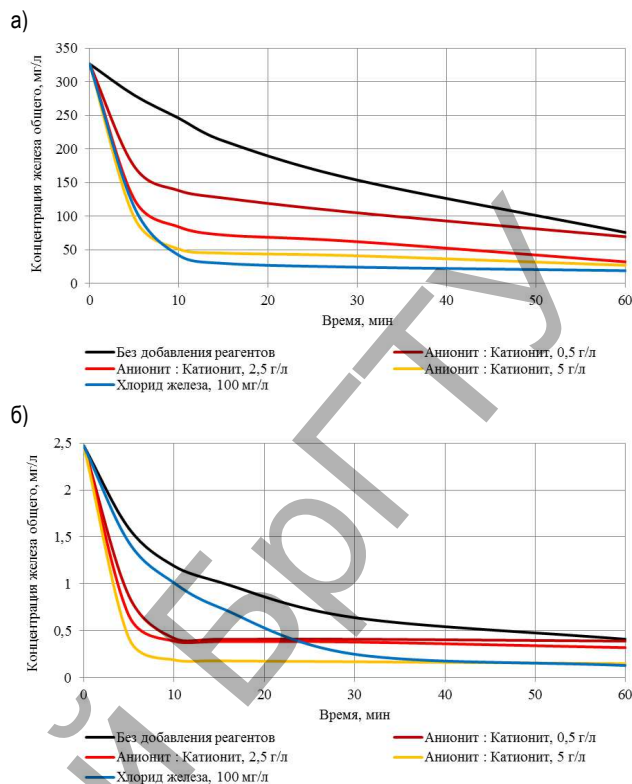
**Таблица 2** – Остаточная концентрации железа при обработке промывных вод коагулянтам, мг/л

Способ введения	После отстаивания		После фильтрования	
	2,5 мг/л	5 мг/л	2,5 мг/л	5 мг/л
Суспензия анионита и катионита	10,8	5,0	0,16	0,15
Анионит, через 1 мин катионит	6,5	6,0	0,24	0,29
Воздушно-сухие анионит и катионит	5,0	8,0	0,16	0,28

Наилучший эффект очистки после стадии отстаивания наблюдается при введении сухих реагентов. После стадии фильтрования для всех вариантов получены сравнимые результаты. При введении катионита и анионита в виде комплекса наблюдается лучший эффект после отстаивания за счет того, что комплекс, образованный отдельно, получается более рыхлым, а хлопья очень крупными, и исходные компоненты включены в комплекс полностью, что способствует быстрому их осаждению. А при образовании комплекса в растворе образуются менее рыхлые и менее крупные хлопья, которые обладают значительно меньшей скоростью осаждения, однако изначальное введение анионита более полно позволяет сорбировать железо из раствора. Таким образом, включая стадию фильтрования приоритет следует отдать этому способу введения реагентов.

**Осаждение взвешенных частиц.** Промывные воды содержат железо, преимущественно в виде нерастворимых соединений. Известно, что гравитационное осаждение взвешенных частиц завершается практически после 1,5–2,0 ч, а большая часть взвеси выпадает в осадок за 15–40 мин отстаивания [3].

На рисунке 3 представлены результаты определения остаточного содержания железа в промывной воде станции обезжелезивания после отстаивания (рис. 3, а) и последующего фильтрования (рис. 3, б).



а – после отстаивания (в течение 60 мин); б – после отстаивания (в течение 60 мин) и фильтрования

**Рисунок 3** – Содержание железа общего в фильтрате

Анализируя графики, представленные на рисунке 3, дозы исследуемого агрегата, начиная с 0,5 г/л, достаточно, чтобы обеспечить остаточное содержание железа общего в очищенной промывной воде менее 0,4 мг/л. При этом хлопья агрегата получаются более крупные, чем при использовании традиционных коагулянтов, это в свою очередь отражается на интенсивности процесса осаждения, который практически заканчивается в первые 10 мин. В то же время при использовании хлорида железа данная эффективность достигается через 25–30 мин.

Поскольку образование центров коагуляции при использовании хлорида железа происходит из раствора, то это приводит к максимально полному улавливанию ионов железа. Такой эффективности можно достичь, используя дозу агрегата из отработанных ионообменных смол более 2,5 г/л.

Удельное сопротивление осадка, образующегося при безреагентном осветлении промывных вод станций обезжелезивания, составило  $27,6 \cdot 10^{10}$  см/г. При использовании сульфата алюминия –  $33,4 \cdot 10^{10}$  см/г, сульфата алюминия в присутствии фосфатов –  $14,0 \cdot 10^{10}$  см/г, коагулянта «Аква-Аурат 30» –  $35,0 \cdot 10^{10}$  см/г, для осадка, образующегося при использовании коагулянта № 6 (катионит : анионит = 1:4) удельное сопротивление фильтрованию равно  $6,8 \cdot 10^9$  см/г, т. е. в 41 раз ниже, что объясняется образованием более рыхлых агрегатов, нежели при использовании неорганических коагулянтов.

Важной задачей при обработке промывных вод станций обезжелезивания является не только осаждение соединений железа, но и обезвоживание и утилизация образующихся осадков. При выполнении работы определялись основные свойства осадков, образующиеся при безреагентном отстаивании промывных вод и при очистке промывных вод коагулированием. Осадок отбирался давлением после двух часов отстаивания, расход коагулянта (с соотношением катионит : анионит равным 1:1) равен 1 г на 1 г сухого вещества промывных вод.

Образующийся обезвоженный осадок промывных вод станций обезжелезивания было предложено использовать в технологии изготовления керамических изделий. Элементный состав воздушно-сухого осадка, образующегося при использовании коагулянта №6 (в

мас.%): углерод – 26,8; кислород – 21,0; магний – 0,2; алюминий – 0,3; кремний – 1,4; фосфор – 1,1; кальций – 4,5; марганец – 1,0; железо – 22,9; влажность – 20,8.

Теплотворную способность осадка Q, кДж/кг, рассчитывали по данным элементного анализа по формуле Менделеева.

Для отработанных синтетических ионитов она составляет: 32193 кДж/кг для отработанного анионита АВ-17-8 и 17891 кДж/кг для отработанного катионита КУ-2-8.

Тогда для осадка, полученного с использованием коагулянта в соотношении анионит : катионит равном 1 : 1, при дозе 1 г коагулянта на 1 г сухого вещества промывных вод, теплотворная способность составит 12521 кДж/кг. Таким образом, при добавлении в шихту 1 кг осадка (в пересчете на сухое вещество) при обжиге будет выделяться 12521 кДж энергии. Наличие выгорающего компонента – ионообменных смол многофункционально. При обжиге продуктов выделяется дополнительное количество тепла, что приводит к более равномерному обжигу и снижению температуры обработки (экономия энергии).

Образцы изготовлены с применением шихты для производства кирпича рядового полнотелого одинарного. В качестве глинистой составляющей использовалась глина месторождения «Осетки». Для отощения масс использовался шамот (бой кирпича), песок – месторождения «Скуловичи». Образцы изготовленные с шихты ОАО «Керамика» без добавок (образец А); в качестве плавня и выгорающей добавки использовались отходы обезжелезивания воды (образец Б) и отходы обезжелезивания воды с отходами ионообменных смол АВ-17 и КУ-2, образующихся в процессе водоподготовки (в сочетании 50/50) (образец В).

Содержание глинистой составляющей – 69,6%, шамота – 11,7%. песка – 18,7%. Зерновой состав шамота: мелкая фракция (до 0,5 мм) – 32% и крупная фракция (1–3 мм) – 68%. Карьерная влажность легкоплавкой глины – 23,5%. Влажность шамота – 1,6%. Влажность песка – 3,8%. Формовочная влажность керамической массы – 17,1%. Количество добавок (сверх 100%) – 20%. Отощение шихты – 28,3%. Влажность – 17,1%. Сушка образцов осуществлялась на воздухе, при температуре – 20–23 °С. Продолжительность сушки – более 96 ч.

Формовка и исследования полученных образцов осуществлялись вручную в аккредитованной лаборатории ОАО «Керамика». Обжиг производился в цехе № 1. Температура обжига, °С: 6 п. 145; 11 п. – 290; 19 п. – 1000; 21 п. – 1000–1048.

**Таблица 3** – Физико-механические показатели испытываемых образцов

Серия образцов	Порядковый номер				Среднее значение
	1	2	3	4	
Водопоглощение, %					
А	16,4	14,5	16,0	16,2	16,0
Б	18,2	17,2	17,5	18,4	17,8
В	19,2	18,8	19,3	18,2	18,9
Прочность при сжатии, МПа					
А	20	20,2	20,6	21,2	20,5
Б	21,3	20,4	22,0	23,2	21,7
В	20,3	20,2	21,0	22,0	20,9
Морозостойкость, циклов					
А	20	20	21	20	20
Б	31	33	35	34	33
В	45	45	45	45	45

Экспериментально показано (ОАО «Керамика» г. Витебск), что использование осадка станции обезжелезивания в качестве железосодержащего пигмента, осажденного отработанными ионообменными смолами, также дает более интенсивную темную окраску черепка (при производстве керамических изделий), чем отдельно используемый осадок станции обезжелезивания.

Увеличение водопоглощения образцов, изготовленных с применением отходов, произошло в связи с интенсификацией процессов спекания (увеличения расплава), что вызвало

интенсификацию газообразования (разложения карбонатов) и увеличение открытой пористости.

Прочность и морозостойкость образцов с отходами выше, чем образцов изготовленных с применением шихты без добавок вследствие увеличения количества стекловидной фазы в образцах так как примеси железа снижают температуру обжига изделий и процесс созревания черепка наступает быстрее. Отходы ионообменных смол играют роль выгорающей добавки, благодаря которой температура внутри материала возрастает быстрее, что положительно влияет на образование стекловидной фазы и, как следствие, созревание черепка. Эти факторы положительно влияют на показатель морозостойкости образцов с добавлением отходов, а добавление ионообменных смол вызывает образование пор внутри материала, которые релаксируют возникающие температурные колебания в материале.

**Заключение.** В ходе выполнения исследований подтверждена эффективность использования отходов отработанных ионитов для очистки высококонцентрированных железосодержащих промывных вод. Исследовано влияние способа введения реагентов на степень очистки: при образовании комплекса в растворе образуются менее рыхлые и менее крупные хлопья, которые обладают значительно меньшей скоростью осаждения, однако изначальное введение анионита более полно позволяет сорбировать железо из раствора.

В ходе исследования реагентной очистки промывных вод станции обезжелезивания установлено, что наилучший результат в течение двух часов отстаивания наблюдается при использовании коагулянта №6 расходом 1,0 г/л. Остаточная концентрация железа составила 1,3 мг/л, эффект очистки при этом составил 99,4%. После стадии фильтрования остаточная концентрация железа общего составляет менее 0,3 мг/л. Удельное сопротивление осадка, образующегося при обработке промывных вод с использованием ионообменных смол ниже в 41 раз, чем при безреагентном отстаивании и в 49–51 раз ниже, чем при использовании традиционных коагулянтов.

Подтверждена возможность использования образующегося осадка в технологии изготовления керамических изделий строительного назначения. Экспериментально показано, что использование осадка станции обезжелезивания, осажденного отработанными ионообменными смолами, дает более интенсивную темную окраску черепка, а также приводит к увеличению морозостойкости.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Охрана окружающей среды в Беларуси: Статистический сборник / Министерство статистики и анализа Республики Беларусь. – Минск., 2005.
2. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества: СанПиН 10-124 РБ 99. Введ. 26.11.06. – Минск: Министерство здравоохранения Республики Беларусь.
3. Любарский, В.М. Осадки природных вод и методы их обработки / В.М. Любарский – М.: Стройиздат, 1980. – 128 с.
4. Станкевич, Р.А. Обезжелезивание подземных вод в водоносном пласте: предпосылки и методы / Р.А. Станкевич // Вода. – №10. – 2001. – С. 22–23.
5. Романовский, В.И. Термохимическая и механохимическая переработка отходов сетчатых полимеров: дис. ...канд. тех. наук: 25.00.36 – Геоэкология; 05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов / В.И. Романовский; БГТУ. – Минск, 2008. – 178 с.
6. Романовский, В.И. Распределение гетероатомов синтетических ионитов в продуктах пиролиза / В.И. Романовский, В.Н. Марцупль // Журнал прикл. хим. – 2009. – Т. 82, № 5. – С. 782–785.
7. Житенев, Б.Н. Проблемы повторного использования промывных вод станций обезжелезивания воды / Б.Н. Житенев, Л.Е. Шеина // Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и экология. – №2(14). – 2002. – С. 31–32.
8. Николадзе, Г.И. Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения / Г.И. Николадзе, Д.М. Минц, А.А. Кастальский. – М.: Высшая школа, 1984. – 368 с.

Results on use of wastes of water purification – used-up ion-exchange resins KU-2-8 and AB-17-8 in a role of coagulants for clearing of washing waters of iron removal stations are presented. In work the optimum dose of coagulants is defined, efficiency of clarification of washing waters, residual concentration of iron in washing water after 2 hours of sedimentation, specific resistance to filtering of a received deposit is defined. The direction of formed sediments is offered.

УДК 628.16

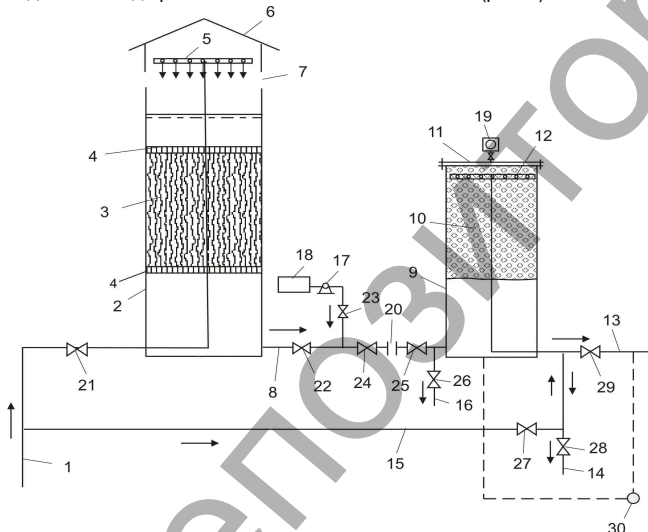
Стасюк С. Р.

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

**Введение.** Основным источником сельскохозяйственного водоснабжения в Украине являются подземные воды, которые характеризуются чаще всего повышенным содержанием железа и солей жесткости.

Железо является очень важным элементом в организме человека и животных, однако его повышенное содержание вредно для здоровья. Железо является составной частью гемоглобина крови, оно принимает участие в перенесении кислорода в живом организме, поскольку легко переходит с двухвалентной формы в трехвалентную и наоборот, а также является биологическим катализатором. Однако при длительном поступлении железа в организм происходит разрушение клеток печени, поскольку соединения железа сорбируют на своей поверхности ионы тяжелых металлов и радионуклидов, что приводит к тяжелым заболеваниям человека [1]. Поэтому содержание железа в питьевой воде не должно превышать 0,2 мг/дм<sup>3</sup> [2, 3]. Наличие в воде солей кальция и магния обуславливает ее жесткость, которая для питьевой воды не должна быть больше 7 мг-экв/дм<sup>3</sup> или как исключение – до 10 мг-кв/дм<sup>3</sup> [2, 3].

**Установка для обезжелезивания и умягчения воды.** В Институте водных проблем и мелиорации Национальной академии аграрных наук Украины получен патент на универсальную установку для обезжелезивания и умягчения воды [4], которая обеспечивает удаление из подземных вод примесей железа и солей жесткости (рис. 1).



1 – подача исходной воды; 2 – водовоздушный бак; 3 – тонковолокнистая фильтрующая загрузка; 4 – колосниковые решетки; 5 – аэратор; 6 – крыша; 7 – воздухопропускные окна; 8 – подача предварительно обработанной воды; 9 – контактный осветлительный фильтр (КОФ); 10 – плавающая пенополистирольная фильтрующая загрузка; 11 – крышка; 12 – колпачковый дренаж; 13 – отвод фильтрованной воды; 14 – сброс первого фильтрата; 15 – подача воды на промывку; 16 – опорожнение системы; 17 – насос-дозатор; 18 – бак с раствором реагента; 19 – вантуз; 20 – шайбовый смеситель; 21–29 – задвижки; 30 – дифманометр

**Рисунок 1** – Технологическая схема обезжелезивания и умягчения воды

Установка работает так. Исходная подземная вода по трубопроводу 1 поступает в водовоздушный бак 2 через аэратор 5, мелкие капли воды падают вниз с высоты не менее 0,5 м, насыщая воду кислородом воздуха, который поступает через окна 7, иммобилизованные на волокнистой загрузке 3 специфические железобактерии интенсивно переводят двухвалентное железо  $Fe(HCO_3)_2$ , растворенное в исходной воде, в трехвалентную форму, образуя хлопья из малорастворимого гидроксида железа  $Fe(OH)_3$ , которые с водой по трубопроводу 8 поступают в осветлительный фильтр 9. По этому же трубопроводу насос-дозатор 17 из бака 18 подает расчетный расход известкового раствора для связывания ионов жесткости в малорастворенные соединения после перемешивания его в шайбовом смесителе 20. В осветлительном фильтре 9 при восходящем фильтровании воды возникают благоприятные условия для ее глубокого обезжелезивания и умягчения. Фильтрованную воду собирают колпачковым дренажем 12 и отводят по трубопроводу 13. После пуска фильтра в эксплуатацию со свежей плавающей фильтрующей загрузкой 10 сначала сбрасывают первый фильтрат по трубе 14 в канализацию, а потом подают очищенную воду потребителям по трубе 13. Контроль за потерями напора в фильтре осуществляют дифманометром 30. При достижении его предельной величины фильтр промывают. Для этого закрывают задвижки 21, 22, 23, 24, 25, 28 и 29 и открывают задвижки 27 и 26. Вода, двигаясь в обратном направлении, расширяет пенополистирольную загрузку 10 и вымывает из него большую часть загрязнений, которые по трубопроводу 16 сбрасываются в канализацию. Промывку фильтра нужно выполнять при определенной интенсивности на протяжении расчетного времени для обеспечения «зарядки» фильтра, при условии соответствия качества фильтрованной воды нормативным требованиям и исключения необходимости сбрасывания первого фильтрата по трубопроводу 14.

Преимущество данной установки состоит в обеспечении высокой эффективности очистки воды от соединений железа и солей жесткости при меньшей себестоимости очищенной воды.

**Методы обезжелезивания подземных вод.** Для удаления железа из подземных вод можно использовать два метода [5]:

- физико-химический, при котором происходит окисление железа  $Fe^{2+}$  у  $Fe^{3+}$  и задержание полученного осадка  $Fe(OH)_3$ ;
- биологический, при котором специфические железобактерии *Gallionella ferruginea* очень быстро окисляют двухвалентное железо, а продукты окисления компактно уплотняют [6, 7].

Для биологического обезжелезивания подземных вод необходимо выполнять такие условия:

- насыщение исходной водой кислородом осуществлять в точном соответствии со стехиометрическим количеством, необходимым для окисления  $Fe^{2+}$ :

$$Fe^{2+} : [O_2] = 0,143, \quad (1)$$

т. е. на окисление 1 мг двууглекислого железа необходимо 0,143 мг кислорода;

- создать благоприятные условия для закрепления железобактерий. Насыщение воды кислородом целесообразно выполнять методом упрощенной аэрации путем разбрызгивания воды аэратором,

Стасюк Сергей Ростиславович, старший научный сотрудник Института водных проблем и мелиорации Национальной академии аграрных наук Украины.

Украина, г. Киев, ул. Васильковская, 31/17.