



А.Д. Гуринович
Белостокский технологический университет

Б.Н. Житенёв
Брестский государственный технический университет

ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ, ОБУСЛАВЛИВАЮЩИХ ЦВЕТНОСТЬ ВОДЫ, УЛУЧШЕННОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

Приводятся результаты лабораторных исследований и полупромышленных испытаний очистки поверхностных вод от примесей, обуславливающих их цветность улучшенной электрохимической технологией, включающей на первой ступени электроокисление на нерастворимых электродах, на второй – коагуляцию гидроксидом алюминия, полученного путем растворения алюминиевых электродов.

Очистка поверхностных вод, органические примеси поверхностных вод, электрокоагуляция, улучшенная электрохимическая технология очистки воды.

С 90-х годов в Республике Беларусь прослеживается тенденция к снижению объемов забора воды. Наибольшее сокращение характерно для забора поверхностных вод, за счет которых в основном обеспечиваются нужды промышленности и теплоэнергетики. Наблюдается увеличение использования подземной воды питьевого качества для производственных целей. В Брестской, Минской областях и городе Минске более 60% воды, используемой на производственные нужды, – это вода питьевого качества. Такое нерациональное потребление питьевой воды ведет к дополнительным затратам и удорожанию продукции, выпускаемой предприятиями. Альтернативой является использование поверхностных вод. Поверхностные воды более доступны, к тому же они являются более мягкими и слабоминерализованными по сравнению с подземными. Это выгодно отличает их при употреблении воды для технических целей, при которых накладываются ограничения по жесткости и солесодержанию. Широкому использованию поверхностных вод для технического водоснабжения препятствуют присутствующие в них органические и минеральные примеси. Для сокращения потерь тепла в последнее время применяется децентрализация систем отопления, вводятся в строй небольшие предприятия, в том числе и теплоэнергетики, для функционирования которых нужны сравнительно небольшие объемы воды. В этих условиях возникает необходимость в высокоэффективных очистных установках для очистки воды в небольших объемах. Перспективным направлением является использование электрохимических методов водоподготовки. Ввод в эксплуатацию атомной электростанции в Республике Беларусь является еще одним весомым аргументом в пользу электрохимии. В работах [1–4] показана высокая эффективность электрокоагуляции для очистки поверхностных вод от органических примесей, обуславливающих цветность воды. Однако в ряде случаев для достижения нужной степени очистки требуются повышенные расходы алюминия.

С целью снижения затрат металлического алюминия на обработку единицы объема воды был разрабо-

тан и исследован метод обесцвечивания воды электрокоагуляцией с улучшенной окислительной технологией, включающий электрохимическое окисление на нерастворимых электродах с последующей электрокоагуляцией.

Опыты проводились в лабораторных условиях и на полупромышленной установке производительностью до 3 м³/сутки. Установка состояла из аппарата для улучшенной электрохимической обработки воды, включающего комплект нерастворимых электродов с автономным источником питания, контактную камеру и комплект наклонно размещенных растворимых электродов, питание которых осуществлялось от выпрямителя ВСА-24 М. В качестве нерастворимого анода использовался составной перфорированный электрод, состоящий из титановой основы, покрытой слоем оксида свинца, нанесенного электрохимическим методом. Катодом служила титановая перфорированная пластина с диаметром отверстий 5 мм. В качестве растворимых электродов были использованы пластины низкосортного алюминия.

Вода из бака поступала в устройство для электрохимического обесцвечивания, включающее комплект нерастворимых электродов, контактную камеру и пакет наклонно размещенных алюминиевых электродов. Энергоснабжение обоих комплектов осуществлялось от автономных источников постоянного тока. Обрабатываемая жидкость подвергалась электрохимическому окислению под воздействием активных радикалов, атомарного и молекулярного кислорода, хлора, выделяющихся на нерастворимых электродах. Контакт окислителя с жидкостью обеспечивался в камере, рассчитанной на время пребывания воды до 15 минут, после окисления жидкость проходила электрокоагуляционный блок и направлялась на модель контактного осветлителя.

В процессе лабораторных экспериментов исследовалось совместное влияние дозы алюминия, плотности тока на окислительных электродах и времени обработки на обесцвечивание как модельной, так и речной воды. Были найдены значения указанных фак-

Показатели качества воды р. Мухавец

№ п/п	Показатели	Ед. измерения	Величина
1	Цветность воды	град.	110,0
2	Железо, общ.	мг/л	0,8
3	Кремниевая кислота по SiO ₂	мг/л	28,0
4	Окисляемость	мг O ₂	23,0
5	pH	Ед. pH	7,5

торов, при которых достигается наибольший эффект очистки: $D_{Al^{3+}} = 6,5$ мг/л, $i = 21$ мА/см², $t = 9,6$ мин.

Для апробации предлагаемой технологии были проведены полупромышленные испытания. Эксперименты по очистке воды улучшенной электрохимической технологией проводились в цехе химводоочистки Брестской ТЭЦ. В качестве объекта испытания использовалась вода р. Мухавец. Показатели качества исходной воды представлены в таблице.

Плотность тока при испытании составляла 15–25 мА/см². В процессе производственных испытаний исследовалось влияние дозы алюминия, плотности тока на окислительных электродах, а также продолжительности электрообработки на обесцвечивание, обезжелезивание, обескремнивание воды улучшенной окислительной технологией.

Результаты испытаний подтвердили выводы, полученные на основании лабораторных исследований: наиболее сильное влияние на процесс оказывает доза алюминия, несколько слабее проявлялось влияние плотности тока на нерастворимых электродах и продолжительности обработки (рис. 1–3).

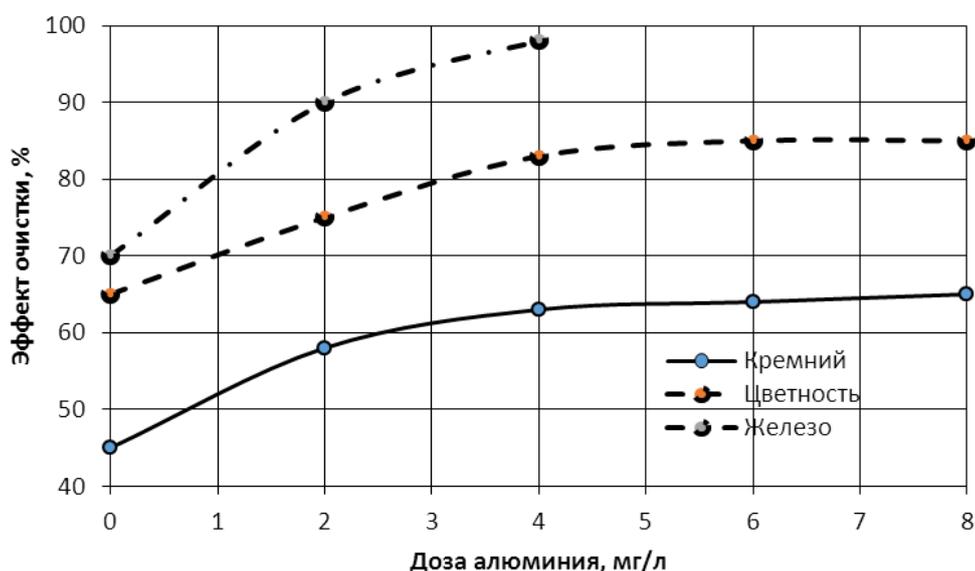


Рис. 1. Влияние дозы алюминия на эффект очистки воды, улучшенной окислительной технологией в производственных условиях (плотность тока 20 мА/см², продолжительность обработки 10 мин)

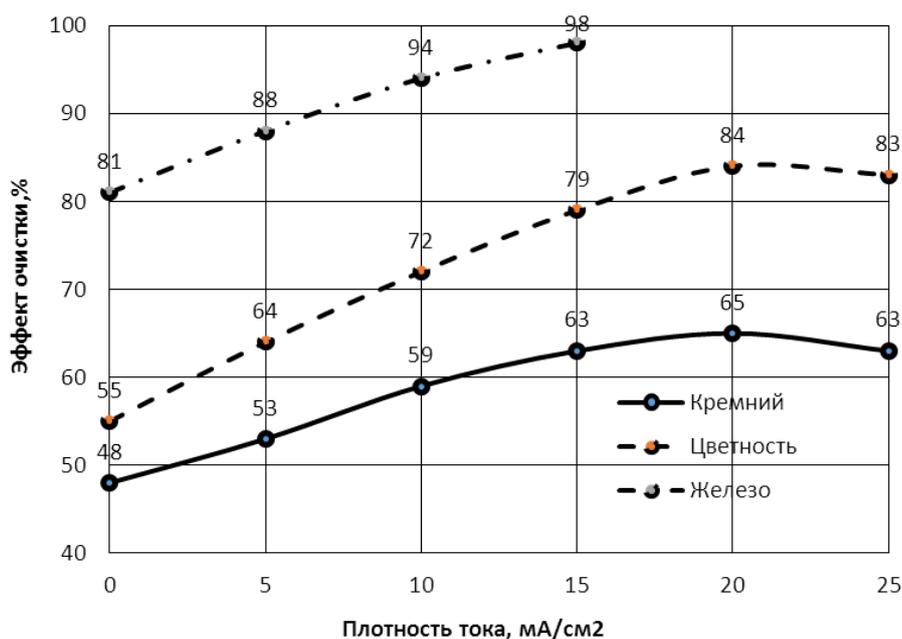


Рис. 2. Влияние плотности тока на эффект очистки воды, улучшенной окислительной технологией в производственных условиях (доза алюминия 5 мг/л, продолжительность обработки 10 мин)

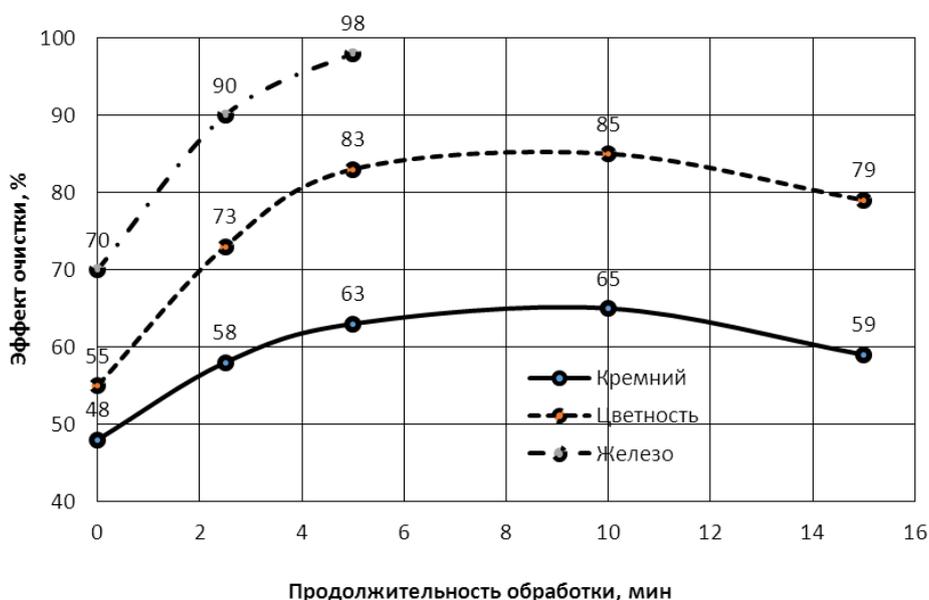


Рис. 3. Влияние продолжительности обработки на эффект очистки воды, улучшенной окислительной технологией в производственных условиях (доза алюминия 5 мг/л, плотность тока 20 мА/см²)

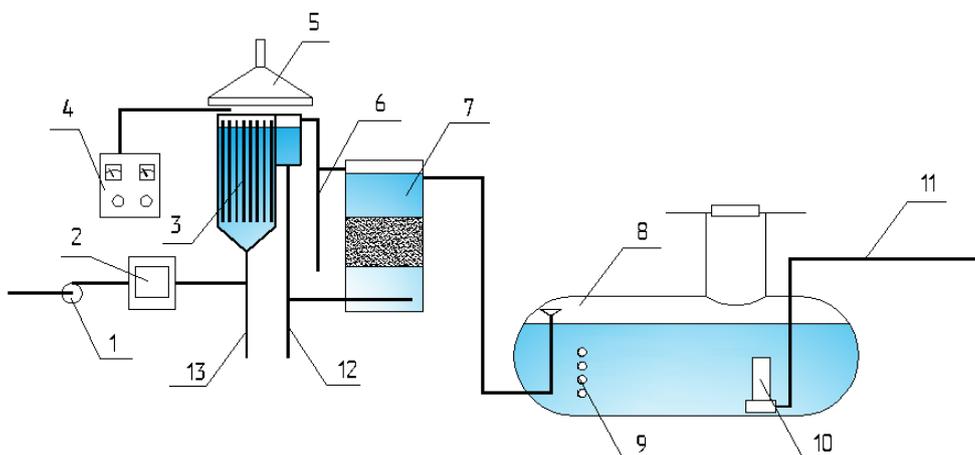


Рис. 4. Технологическая схема обезвреживания воды электрокоагуляцией:
 1 – насосы первого подъема, 2 – сетчатый фильтр, 3 – электрокоагулятор с алюминиевыми электродами, 4 – вытяжной вентилятор, 5 – вытяжная вентиляция, 6 – переливной трубопровод, 7 – фильтр с плавучей загрузкой, 8 – резервуары чистой воды, 9–10 – насосы второго подъема, 11 – подача воды потребителям, 12 – отвод промывной воды, 13 – трубопровод опорожнения электрокоагулятора

При проектировании установок для очистки природных вод от органических примесей электрокоагуляцией и улучшенной электрохимической технологией необходимо учитывать состав водного гумуса. При коэффициенте цветности (отношении цветности воды к перманганатной окисляемости) более 5, что свидетельствует о присутствии сильноокрашенных гуминовых кислот (ГК), надлежит использовать электрокоагуляцию. При значении коэффициента цветности менее 5 следует предусматривать улучшенную электрохимическую обработку, включающую предварительное электрохимическое окисление с последующей электрокоагуляцией.

При обезвреживании воды производительность одного электрокоагулятора при круглосуточной работе не должна превышать 240 м³/сутки (10 м³/ч). Дозу алюминия следует устанавливать технологическим моделированием, при отсутствии данных рекомендуется назначать в пределах 2...5 мг/дм³, плотность тока на

растворимых алюминиевых электродах 1–2 мА/см², расстояние между растворимыми электродами 5–15 мм. В качестве растворимых электродов следует применять листы низкосортного алюминия толщиной 10–15 мм, линейные размеры алюминиевых электродов для упрощения конструкции пакета не должны превышать 0,5 м, для равномерного износа электродов необходимо предусматривать периодическую переполюсовку (через 15–60 мин). Установка обезвреживания воды электрокоагуляцией должна снабжаться автономной вытяжной вентиляцией. Электрооборудование установки выполняется во взрывобезопасном исполнении. Не рекомендуется установка электрокоагуляторов в подвальных помещениях, количество аппаратов устанавливается расчетом и принимается не менее двух. При общем количестве аппаратов до 3-х на случай аварии, замены электродов, профилактического ремонта необходимо иметь один резервный, а при количестве их свыше 3–2.

Расчет рекомендуется выполнять по следующему алгоритму:

Исходные данные:

- цветность обрабатываемой воды $Ц$, град.;
- перманганатная окисляемость $ПО$, мг/л O_2 ;
- активная реакция среды, ед. рН;
- средняя температура t , °С;
- удельная проводимость воды λ , $Ом^{-1} \cdot м^{-1}$;
- расход воды Q_0 , $м^3/ч$.

Требуемый эффект обесцвечивания воды, %

$$\mathcal{E}_{mp} = \frac{Ц_{исх.} - Ц_{очищ.}}{Ц_{исх.}} \cdot 100. \quad (1)$$

Определяется коэффициент цветности

$$K_{цв.} = \frac{Ц_{исх.}}{ПО}. \quad (2)$$

Задавшись плотностью тока на растворимых электродах $i = 1-2$ $мА/см^2$, рассчитывается выход алюминия по току (η_o):

$$\eta_o = 172,8 - 16,7 \cdot i_p + 6,2 \cdot t - 12,8 \cdot pH + 1,5 \cdot i_p \cdot pH + 0,1 \cdot t \cdot pH + 0,1 \cdot i_p \cdot t - 0,2 \cdot t^2 + 0,9 \cdot pH^2, \quad (3)$$

где i_p – плотность тока, $мА/см^2$;

t – температура воды,

pH – активная реакция среды, ед. рН.

Сила тока $I_{ЭК}$, А, для растворения потребного количества алюминия

$$I_{ЭК} = \frac{D_{Al^{3+}} \cdot Q_0 \cdot 100}{c \cdot \eta_o}, \quad (4)$$

где $D_{Al^{3+}}$ – доза алюминия, $г/м^3$; ($мг/дм^3$);

C – электрохимический эквивалент алюминия ($C = 0,336$ $г/А \cdot ч$);

- площадь растворимых электродов $F_{ЭК}$, $м^2$:

$$F_{ЭК} = \frac{I_{ЭК}}{i_p \cdot 10}, \quad (5)$$

- количество растворимых электродов (анодов), шт

$$N_{an} = \frac{F_{ЭК}}{2 \cdot L_{an} \cdot H_{an}} \quad (6)$$

где L_{an} , H_{an} – соответственно ширина и высота растворимых электродов (рекомендуется до 0,5 м)

2 – коэффициент, учитывающий работу обеих сторон растворимых электродов.

Количество катодов, шт.:

$$N_{kat} = N_{an} + 1, \quad (7)$$

- напряжение $U_{ЭК}$ на растворимых электродах:

$$U_{ЭК} = \varphi_A - \varphi_K + \eta_{\Delta} + \eta_{\Phi} + \eta_{д} + I_{ЭК}(R_{\Delta} + R_K + R_T), \quad (8)$$

где φ_A – потенциал анода, В;

φ_K – потенциал катода, В;

η_{Δ} – электрохимическое перенапряжение, В;

η_{Φ} – фазовое напряжение, В;

$\eta_{д}$ – диффузионное перенапряжение, В;

$I_{ЭК}$ – сила тока, А;

R_{Δ} – сопротивление электролита, Ом;

R_K – сопротивление контактов, Ом;

R_T – сопротивление тоководов, Ом.

Величинами φ_A , φ_K , η_{Δ} , η_{Φ} , $\eta_{д}$, R_K , R_T для практических расчетов можно пренебречь;

- сопротивление электролита R_{Δ} , Ом, рассчитывают по зависимости:

$$R_{\Delta} = \frac{l_{\Delta}}{F_{ЭК} \cdot \lambda}, \quad (9)$$

где λ – удельная проводимость воды ($Ом^{-1} \cdot м^{-1}$).

Напряжение на электродах $U_{ЭК}$, В:

$$U_{ЭК} \approx I_{ЭК} \cdot R_{\Delta}, \quad (10)$$

- удельные затраты электроэнергии на $W_{ЭК}$, $кВт \cdot ч/м^3$, на электрокоагуляцию составят:

$$W_{ЭК} = \frac{I_{ЭК} \cdot U_{ЭК}}{1000 \cdot Q_0}, \quad (11)$$

Если в составе водного гумуса присутствуют фульвокислоты, то для интенсификации процесса обесцвечивания следует предусматривать электроокисление, т.е. производить улучшенную электрохимическую обработку. Технологическая схема приведена на рис. 5.

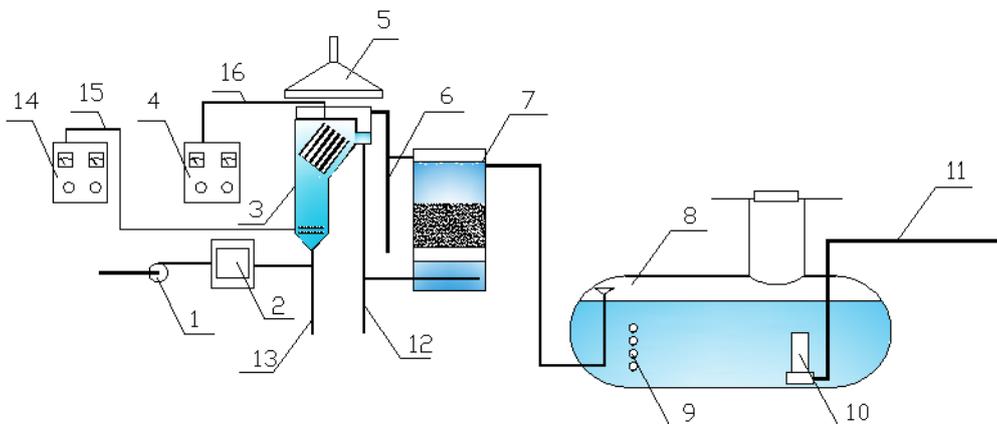


Рис. 5. Технологическая схема обработки воды улучшенной электрохимической технологией:

- 1 – насосы первого подъема, 2 – сетчатый фильтр, 3 – аппарат комплексного электрохимического обесцвечивания, 4 – источник питания пакета растворимых электродов, 5 – вытяжная вентиляция, 6 – переливной трубопровод, 7 – фильтр с плавающей загрузкой, 8 – резервуары чистой воды, 9 – бактерицидные лампы, 10 – насосы второго подъема, 11 – подача воды потребителям, 12 – трубопровод отвода промывной воды,

13 – трубопровод полного опорожнения аппарата, 14 – выпрямитель для электроснабжения пакета нерастворимых электродов, 15, 16 – провода (токоведущие шины)

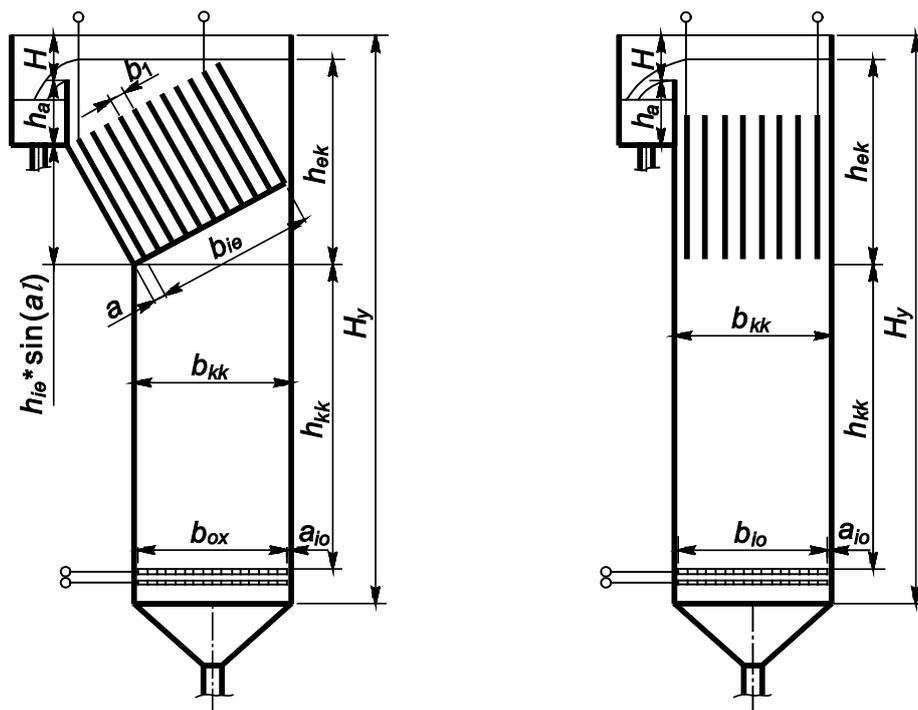


Рис. 6. Расчетные схемы аппарата для комплексного электрохимического обесцвечивания воды

При проектировании установок улучшенного электрохимического обесцвечивания воды необходимо учитывать следующие рекомендации. Основные технологические параметры процесса необходимо принимать на основании данных технологических исследований, выполненных на воде предполагаемого источника водоснабжения. Производительность одного аппарата при круглосуточной работе не должна превышать 240 м³/сутки. В качестве материала нерастворимых окислительных электродов для повышения селективности электроокисления предпочтительнее использовать электроды с высоким перенапряжением выделения кислорода (аноды: титановые, покрытые оксидом свинца; керамические, покрытые PbO₂; ОР-ТА; графитовые, титановые с алмазным покрытием; катоды: титановые). Плотность тока в зависимости от требуемого эффекта обесцвечивания на нерастворимых электродах рекомендуется поддерживать в пределах 15–25 мА/см². Продолжительность пребывания воды в контактной камере 10–15 минут. Восходящая скорость движения воды в контактной камере от 10 до 15 м/ч. Плотность тока на растворимых алюминиевых электродах от 1 до 2 мА/см². Расстояние между нерастворимыми электродами от 0,005 до 0,010 м. Пакет растворимых электродов следует проектировать с учетом формул (1–11). Пакеты растворимых электродов целесообразно размещать под углом 30–60 градусов над контактной камерой для очистки межэлектродного пространства от продуктов реакции под воздействием электрофлотации. Установка улучшенного электрохимического обесцвечивания (УУЭО) должна снабжаться автономной вытяжной вентиляци-

ей. Электрооборудование установки выполняется во взрывобезопасном исполнении.

По значению \mathcal{E}_{mp} по номограмме определяют необходимую дозу алюминия, плотность тока на нерастворимых электродах, продолжительность обработки. При этом необходимо учитывать, если $K_{\text{ус}} < 3$, то требуемый эффект \mathcal{E}_{mp} следует увеличить на 10–15% и технологические параметры определять по номограмме с учетом сделанной поправки, учитывающей, что в составе водного гумуса преобладают слабоокрашенные истинно растворенные фульвокислоты.

Расчет блока электрокоагуляции осуществляется по формулам (12–25): площадь контактной камеры F_{KK} , м²:

$$F_{KK} = \frac{Q_u}{V_{KK}}, \quad (12)$$

где V_{KK} – восходящая скорость воды в КК, м/ч;

- размеры контактной камеры (b_{KK} , м), принимая ее квадратной в плане:

$$b_{KK} = \sqrt{F_{KK}}, \quad (13)$$

- объем контактной камеры, м³:

$$W_{KK} = \frac{Q_u \cdot t_{KK}}{60}, \quad (14)$$

где t_{KK} – время пребывания воды в КК;

- высота (h_{KK} , м) контактной камеры составит:

$$h_{KK} = \frac{W_{KK}}{F_{KK}}, \quad (15)$$

- нерастворимые электроды принимаются квадратными в плане, размеры, м:

$$b_{OX} = b_{KK} - 2a_1, \quad (16)$$

где a_1 – расстояние между окислительными электродами и стенкой аппарата ($a = 0,010-0,015$ м);

- общая площадь отверстий нерастворимых электродов F_{oms} , м²:

$$F_{oms} = 0,3 \cdot b_{OX}^2, \quad (17)$$

где 0,3 – величина, учитывающая, что общая площадь отверстий не должна превышать 30% площади электродов (b_{OX}^2);

- общее количество отверстий в одном электроде составит:

$$n = \frac{4 \cdot F_{oms}}{\pi \cdot d_{oms}^2}, \quad (18)$$

где d_{oms} – диаметр одного отверстия (0,005-0,010 м);

- сила тока на нерастворимых электродах I_{OX} , А, рассчитывается по формуле:

$$I_{OX} = i_{OX} \cdot (b_{OX}^2 - F_{oms}), \quad (19)$$

где i_{OX} – плотность тока на нерастворимых электродах;

- общая высота УКЭО H_V , м, составит:

$$H_V = h_{KK} + h_{ЭК} + h_{доп.}, \quad (20)$$

где $h_{доп.}$ – высота бортов, (0,1–0,2 м);

- высоту водосливной стенки h_6 , м, следует определять по выражению:

$$H = \left(\frac{Q_ч}{0,46 \cdot b_{KK} \cdot \sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (21)$$

где H – напор над водосливной стенкой, м;

- размеры сборного кармана принимаются конструктивно. Диаметр отводящей трубы рассчитывается из условия обеспечения скорости воды $V = 0,6-1,0$ м/с;

- сопротивление электролита между окислительными электродами R_{OX} , Ом:

$$R_{OX} = \frac{l_{ox}}{0,7 \cdot b_{OX}^2 \cdot \lambda}, \quad (22)$$

где λ – удельная проводимость воды (Ом⁻¹·м⁻¹).

Напряжение на электродах, В:

$$U_{OX} \approx I_{OX} \cdot R_{OX}, \quad (23)$$

- удельные затраты электроэнергии W_{OX} , кВт·ч/м³, на окисление органических загрязнений:

$$W_{OX} = \frac{I_{OX} \cdot U_{OX}}{1000 \cdot Q_ч}, \quad (24)$$

- общий расход электроэнергии W , кВт·ч/м³, составит

$$W = W_{ЭК} + W_{OX}. \quad (25)$$

Широкому использованию поверхностных вод для технического водоснабжения препятствуют присутствующие в них органические и минеральные примеси. Перспективным направлением является использование электрохимических методов водоподготовки.

В статье приведены результаты лабораторных исследований и полупроизводственных испытаний по очистке воды улучшенной электрохимической технологией выполненные в цехе химводоочистки Брестской ТЭЦ. Предложены рекомендации по проектированию установок для электрохимического обесцвечивания воды.

Литература

1. Кульский, Л. А. Поведение алюминиевых анодов при обесцвечивании природных вод. Химия и технология воды / Л. А. Кульский, П. П. Строкач, Б. Н. Житенёв. – 1984. – Т.6, № 4. – С. 349–358.
2. Кульский, Л. А. Влияние солевого состава воды на анодное окисление алюминия. Химия и технология воды / Л. А. Кульский, П. П. Строкач, Б. Н. Житенёв. – 1984. – Т.6, № 3.
3. Очистка воды электрокоагуляцией / Л. А. Кульский, П. П. Строкач, В. А. Слипченко, Е. И. Сайгак. – Киев : Будзивельник, 1978. – 112 с.
4. Житенёв, Б. Н. Обесцвечивание и обезжелезивание подземных вод, содержащих органические примеси электрохимическим методом / Житенёв Б. Н., Рыбак Е. С. // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, геоэкология. – 2017. – № 2 (104). – С. 98–101.
5. Житенёв, Б. Н. Обесцвечивание воды поверхностных вод комплексным электрохимическим методом / Б. Н. Житенёв, А. Д. Гуринович, Н. С. Житенёва // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, геоэкология. – 2013. – № 2 (74). – С. 30–33.

A.D. Hurynovich, B.N. Zhitenyov

CLEANING OF SURFACE WATERS FROM ORGANIC IMPURITIES, WHICH INFLUENCE WATER COLOR, BY IMPROVED ELECTROCHEMICAL TECHNOLOGY

The results of laboratory studies and semi-production tests for cleaning surface water from impurities, that cause their chromaticity, with improved electrochemical technology are presented. This technology includes electro-oxidation on insoluble electrodes at the first stage and coagulation with aluminum hydroxide obtained by dissolving aluminum electrodes at the second one.

Surface water purification, organic impurities of surface water, electrocoagulation, improved electrochemical water purification technology.