

- Nat. Congr. Chem. Bucharest, 7-10, Sept, 1981, absts. Part ????. S.1, s.a.431-432.
10. Sternberg Solomon и др. Purification of residual Waters by electrochemical oxidation "2nd Nat. Congr. Chem., Bucharest, 7-10, Sept, 1981, abstr. Part.2", S.1, s.a.429.
11. Орлов Д.С., Гришина Л.А., Ерошичева Н.Л. Практикум по биохимии гумуса. - М.: Изд. МГУ, 1969. - 154 с.
12. Кульский Л.А. Теоретические основы и технология кондиционирования воды. - Киев: Наукова думка, 1980.- 564 с.
13. Вощенко З.С. Методика определения гуминовых веществ в природных водах. АКХ им.Памфилова. Инф. письмо № 21. - Л., 1954.- 8с.
14. Шевченко М.А. Физико-химическое обоснование процессов обесцвечивания и дезодорации воды. - Киев: Наукова думка, 1973.-131 с.

УДК 628.337

Яловая Н.П.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ ВОД ДЛЯ НЕБОЛЬШИХ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

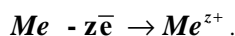
### ВВЕДЕНИЕ

Реализация мероприятий Государственной программы по водоснабжению и водоотведению «Чистая вода» на 2006-2010 годы направлена на решение одной из важнейших социальных задач – обеспечение населения качественной питьевой водой и создание благоприятных условий для проживания населения. Для городских районов эта задача или уже решена, или ее решение находится на стадии завершения. А в сельской местности труженикам села, видимо, еще долго придется пользоваться некачественной водой. Так, менее 1 % систем сельскохозяйственного водоснабжения имеют станции обезжелезивания, в остальных вода подается с содержанием железа, не удовлетворяющим требованиям Санитарных правил и норм (СанПиН) РБ [1]. Сельское население использует воды первых от поверхности земли водоносных горизонтов с помощью шахтных и трубчатых колодцев. В 85 % используемых колодцах вода характеризуется неблагоприятными санитарно-бактериологическими показателями – бактерии группы кишечных палочек достигают 100 ПДК, а более чем в 50 % случаях содержание нитратов и нитритов в 2-3 раза превышает гигиенические нормативы. Свыше 50 % централизованных систем питьевого водоснабжения не имеют необходимых сооружений подготовки воды до нормативных показателей [2]. Поэтому большую актуальность приобретает внедрение новых экологичных технологий улучшения качества воды.

### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ ВОД

Прогрессивным направлением в технологии водоподготовки в настоящее время является разработка и использование электрокоагуляционных процессов, в основе которых лежит анодное растворение металлов и образование нерастворимых гидроксидов с повышенной адсорбционной активностью к загрязнениям воды (электрогенерированных коагулянтов).

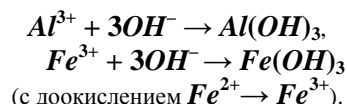
В качестве растворимых применяют электроды, на которых при пропускании электрического тока происходит реакция ионизации металлов:



Согласно теории электрохимической коррозии, при использовании в качестве анода алюминия или железа наиболее вероятными реакциями в природной воде могут быть [3,4,5]:

- анодное растворение:
 
$$Al - 3\bar{e} \rightarrow Al^{3+},$$

$$Fe - 2\bar{e} \rightarrow Fe^{2+};$$
- образование нерастворимых гидроксидов (электрогенерированных коагулянтов):



На алюминиевом или железном катоде в природной воде могут протекать следующие электрохимические процессы:

- деполяризация мигрирующими ионами:
 
$$H^+ + \bar{e} \rightarrow H^0,$$

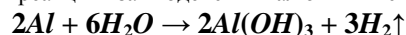
$$Fe^{3+} + \bar{e} \rightarrow Fe^{2+};$$
- деполяризация нейтральными молекулами:
 
$$O_2 + 4\bar{e} + 2H_2O \rightarrow 4OH^-$$
 (в щелочной среде),
 
$$O_2 + 4H^+ + 4\bar{e} \rightarrow 2H_2O$$
 (в кислой и нейтральной среде),
 
$$Cl_2 + 2\bar{e} \rightarrow 2Cl^-;$$
- восстановление ионов металлов и оксидных пленок:
 
$$Fe^{2+} + 2\bar{e} \rightarrow Fe^0,$$

$$Fe_3O_4 + H_2O + 2\bar{e} \rightarrow 3FeO + 2OH^-;$$
- восстановление органических соединений:
 
$$RO + 4\bar{e} + 4H^+ \rightarrow RH_2 + H_2O,$$

$$R + 2\bar{e} + 2H^+ \rightarrow RH_2,$$

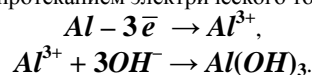
где  $R$  - радикал или молекула органического соединения.

Кроме того, на алюминиевом катоде может протекать химическая реакция взаимодействия алюминия с водой [6]



за счет значительного повышения pH (до 10,5-12) в прикатодном слое во время электролиза и растворения защитной пленки оксида  $Al_2O_3$ .

Электрохимическое растворение металлов включает в себя две основные группы процессов: растворение за счет внешнего тока (анодное растворение металла) и химическое растворение за счет химического взаимодействия с компонентами электролита (коррозионные процессы). Например, на алюминиевом аноде могут протекать химические реакции, непосредственно не связанные с протеканием электрического тока [5,7]



Как видно из приведенных реакций, электрокоагуляционные методы в водоподготовке являются экологически чистыми, исключая вторичное загрязнение воды анионными и катионными остатками, характерными для реагентных методов. Они давно привлекают исследователей и практиков разных стран и характеризуются компактностью установок, легкостью регулирования параметров, возможностью автоматизации процесса и удаления из воды отдельных загрязнений.

Яловая Наталья Петровна, доцент каф. инженерной экологии и химии Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

## 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ВОДОПОДГОТОВКЕ

Электрокоагуляция может использоваться для осветления, обесцвечивания, обескремнивания, обезжелезивания, обескислороживания, частичного умягчения и других способов обработки воды.

Первые исследования по применению метода электрокоагуляции для очистки воды были проведены инженером А.Д. Абрамкиным [8,9]. При плотности тока  $10 \text{ А/м}^2$ , расходе железа  $2 \text{ г}$  и электроэнергии  $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  на  $1 \text{ м}^3$  воды высокоцветная вода, содержащая  $16,5 \text{ мг/дм}^3$  гидрокарбоната железа и  $25 \text{ мг/дм}^3$  оксида кальция, проходя через электролизер с цилиндрическими железными электродами, полностью осветлялась, обесцвечивалась, обезжелезивалась и становилась пригодной для питья, а при повышенных расходах электродного материала и электроэнергии (до  $20 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$ ) становилась пригодной для питания паровых котлов.

Значительные исследования по электрокоагуляционной очистке питьевых вод с применением алюминиевых и железных электродов описаны в работах А.И. Изъюровой и И.П. Овчинкина [10,11]. При использовании алюминиевых анодов, силе тока  $0,35 \text{ А}$ , напряжении  $6 \text{ В}$  и расходе алюминия  $15 \text{ мг/дм}^3$  достигалось снижение цветности воды с  $72$  до  $6$  градусов американской шкалы и увеличение ее прозрачности через  $1$  час с  $1,6$  до  $4,5 \text{ см}$ , через  $3$  часа – до  $22 \text{ см}$ , через  $4$  часа – до  $36 \text{ см}$ . Исследователи указывали, что электрокоагулированием достигалось осветление даже такой устойчивой мутности, которая создается коллоидной глиной.

Исследования по очистке питьевых вод в электролизерах с алюминиевым анодом проводились и за рубежом американскими исследователями Фредом Е. Стюартом и Чарльзом Ф. Бониллой. Очистка воды электрокоагуляцией поверхностных источников с различными цветностью, содержанием взвешенных веществ и жесткостью, показала, что необходимая степень осветления и обесцвечивания воды достигалась при расходе алюминия  $7 \text{ г}$  и электроэнергии  $0,286 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  на  $1 \text{ м}^3$ . Методом электрокоагуляции снижалась цветность с  $70$  до  $14$  град сильнощелочной, с повышенной жесткостью воды г. Майами.

Высокую эффективность метода электрохимического коагулирования воды показали исследования, проведенные в Англии, Голландии и США [12,13] с использованием железных и алюминиевых электродов при небольших затратах электродного материала и электроэнергии.

С.П. Колосков и А.Ф. Комаров указывают [14], что электролитическим коагулированием при расходе  $1,1 \text{ г}$  алюминия и  $0,005 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  электроэнергии на  $1 \text{ м}^3$  воды достигается удаление взвешенных веществ на  $93\%$ .

Исследованиями З.Я. Ярославского установлено [15,16], что электрокоагулированием при плотности тока от  $1$  до  $20 \text{ А/см}^2$  эффективно снижалась мутность, высокая цветность, содержание железа и число бактерий в воде. Расход алюминия составлял  $3,75\text{--}6,68 \text{ г}$ , а электроэнергии  $0,034\text{--}0,04 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  на обработку  $1 \text{ м}^3$  воды.

Работы по осветлению шламовых вод были проведены Н.И. Романовым, В.И. Плужником и Й.Л. Повхом [17]. Соответствующая нормативным показателям очищенная вода, пригодная для возврата в цикл или сброса в водоемы, получалась при расходе железа  $10\text{--}65 \text{ г/м}^3$  шламовой суспензии, содержащей от  $200$  до  $280 \text{ г/дм}^3$  твердого вещества. Сравнительные опыты по осветлению суспензии реагентами полиакриламидом и сульфатом железа показали, что наиболее эффективно протекает осветление при обработке суспензии электрохимическим методом. Обработка воды электролитическим коагулированием в Донецком государственном уни-

верситете показала, что осветление воды с мутностью  $1\ 200 \text{ мг/дм}^3$  достигается на  $96\%$  при плотности тока  $16 \text{ А/см}^2$ . Расход электроэнергии составлял  $0,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  на  $1 \text{ м}^3$  воды. Однако данных о площади анодов, силе тока, напряжении, расходе алюминия или железа на обработку единицы объема воды и др. показателей в работе не приведено.

В.Д. Дмитриевым с сотрудниками установлено [6], что методом прерывистой электрокоагуляции может быть достигнута высокая эффективность снижения цветности воды в разные месяцы и сезоны года (цветность воды снижалась с  $112,5$  до  $12,5$  град). В результате обработки воды в проточном электролизере производительностью  $35 \text{ м}^3/\text{ч}$  с использованием алюминиевых и медных электродов концентрация железа снижалась с  $5,4$  до  $0,03 \text{ мг/дм}^3$ , достигалось полное осветление воды, удаление аммонийного и нитритного азота и снижение на  $20\%$  концентрации  $\text{SiO}_2$ . Расход алюминия составлял  $0,16 \text{ мг/дм}^3$ , электроэнергии  $0,04\text{--}0,06 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  на  $1 \text{ м}^3$  воды.

Исследования по удалению коллоидных примесей железа, кремния и мышьяка, содержащихся в растворах при гидрометаллургическом производстве цинка были проведены проф. В.Д. Пономаревым и Д.А. Тараскиным [18,19]. Обработка растворов с исходным содержанием до  $4,3 \text{ г/дм}^3 \text{ SiO}_2$ , около  $140 \text{ мг/дм}^3$  мышьяка и  $2 \text{ г/дм}^3$  железа осуществлялась постоянным током на установке с алюминиевым или железным анодом при низких значениях рН и температуре  $50\text{--}73^\circ\text{C}$ . При плотности тока  $1,0\text{--}1,3 \text{ А/м}^2$  и расходе электроэнергии  $19,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$  остаточное содержание  $\text{SiO}_2$  составляло  $1,5 \text{ г/дм}^3$ , мышьяка –  $80 \text{ мг/дм}^3$ .

Методом электрокоагуляции проводилась очистка воды р. Неман [20]. При дозе алюминия  $7,8 \text{ мг/дм}^3$  окисляемость исходной воды снижалась на  $50\%$ , жесткость – на  $18,7\%$ , железо удалялось полностью. При производительности электрокоагуляционной установки  $120 \text{ м}^3/\text{ч}$  экономический эффект электрохимической коагуляции во много раз превышал реагентную обработку.

Исследования по очистке воды, проводимые в Институте коллоидной химии и химии воды Академии Наук Украины, показывают возможность получения до  $250\text{--}500 \text{ м}^3/\text{ч}$  качественной питьевой воды на электрокоагуляционных установках при напряжении до  $12 \text{ В}$  и силе тока  $10\text{--}20 \text{ А}$  [3,21].

Процесс электрокоагуляционного обезжелезивания природных вод исследован в работах профессора Николадзе Г.И. [22]. Им установлено, что в электрокоагуляторе с Al-анодами при плотности тока  $0,2\text{--}0,3 \text{ А/дм}^2$  содержание железа в воде при первоначальном значении  $4,6 \text{ мг/дм}^3$  снижалось до  $0,3 \text{ мг/дм}^3$ . При этом достигалось улучшение качества воды по мутности, цветности, окисляемости и др. показателям.

В ряде стран (Франция, Япония, Германия и др.) в последние годы получили распространение бытовые электролизеры с диафрагмой для обработки питьевой воды с целью улучшения органолептических и химических показателей [23, 24].

В Японии электрокоагуляционный метод перспективно развивается для очистки воды от соединений железа и кремния. В установке [25] вода с расходом  $2 \text{ м}^3/\text{ч}$  пропусклась через электролизер с алюминиевыми электродами, установленными на расстоянии  $13 \text{ мм}$  друг от друга. При температуре воды  $50\text{--}55^\circ\text{C}$ , постоянном токе силой  $2,1 \text{ А}$  и плотности  $1 \text{ А/см}^2$ , с наложением переменного тока силой  $2,1 \text{ А}$  и плотностью  $0,1 \text{ А/см}^2$  концентрация  $\text{SiO}_2$  снижалась с  $14$  до  $1,7 \text{ мг/дм}^3$ . Цуда Акира приводит данные по обработке воды с содержанием железа  $5,4 \text{ мг/дм}^3$ , рН=6,6 и цветностью  $40$  град. на установке производительностью  $35 \text{ м}^3/\text{ч}$  [26].

Проведенные разными авторами исследования показывают перспективность метода электрокоагуляции в водоподго-

товке. Однако полученные ими результаты противоречивы по глубине удаляемых загрязнений, расходу металла и электроэнергии на 1 м<sup>3</sup> обрабатываемой воды, плотности тока и т.д. Все описанные исследования проводились кратковременно и для определенных условий. Отсутствуют систематические исследования по влиянию физико-химических, электрических и гидродинамических факторов на процесс электрокоагуляционной очистки воды.

Нет данных по специальным исследованиям с целью удаления конкретных загрязнений. Отсутствуют сведения по удалению сложных гумусовых соединений, содержащихся в поверхностных водах. Длительных исследований по растворению электродов, влиянию на процесс электрокоагуляции различных факторов крайне недостаточно.

### ВЫВОДЫ

1. Проведенные в Брестском государственном техническом университете систематические исследования по влиянию физико-химических, электрических и гидродинамических факторов на процесс растворения алюминиевых анодов при электрокоагуляции и удаления из воды загрязнений, содержащихся в поверхностных водных объектах заболоченных районов Белорусского Полесья, показали, что электрокоагуляцией достигается эффективная очистка природных вод при небольших расходах электродного материала и электроэнергии [27-32].
2. Исследованиями установлено, что электрохимически получаемым гидроксидом алюминия при плотности тока 0,5-5 мА/см<sup>2</sup> можно почти полностью обескремнивать, обескислороживать и обеззараживать воду, удалять из нее минеральные и органические примеси.
3. В результате проведенных исследований найдены оптимальные условия, при которых достигается очистка воды до требований Санитарных правил и норм Республики Беларусь.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сборник санитарных правил и норм по питьевому водоснабжению. СанПиН 10 – 124 РБ 99, СанПиН 10 – 113 РБ 99, СанПиН 8 – 83 – 98 РБ 99. – Мн., 2000. – 152 с.
2. Гуринович А.Д. Современные стратегии повышения эффективности систем водоснабжения и водоотведения населенных мест, сельскохозяйственного и промышленного производства. // Вода, №9, 2005. – 4 с.
3. Кульский Л.А., Строкач П.П. Технология очистки природных вод. – Киев: Вища школа, 1981. – 328 с.
4. Лукашев Е.А., Лукашева Г.Н., Соколов И.П. Электрохимическая коррозия. – М.: МГУС, 2002. – 68 с.
5. Скорчелетти В.В. Теоретическая электрохимия. – Л.: Химия, 1974. – 567 с.
6. Яковлев С.В., Краснобородько И.Г., Рогов В.М. Технология электрохимической очистки воды. – Л.: Стройиздат, 1987. – 312 с.
7. Голубев А.И. Анодное окисление алюминиевых сплавов. – М.: Изд-во АН СССР, 1961.
8. Абрамкин А.Д. Аппарат для очистки воды электрическим током. КЛ 85в, 1/30, опубл. 15.09.1924.
9. Абрамкин А.Д. Об очистке воды при помощи постоянного электрического тока. // Электричество, № 2, 1925.
10. Изьорова А.И., Овчинкин И.П. Очистка воды электролизом с алюминиевыми электродами. // Гигиена и санитария, №3. – 1947.
11. Изьорова А.И., Овчинкин И.П. Очистка воды электролизом с применением железных электродов. // Гигиена и санитария, №7.– 1948.

12. Конюшков А.М. Современные способы очистки хозяйственно-питьевой воды. // Инф. сб. ЦНИИС, вып.24. – М.: Госстройиздат, 1959.
13. Degrement Water Treatment Handbook, London, 1965.
14. Колосков С.Ц., Комаров А.Ф. Подготовка воды в пищевой промышленности. – М.: Пищепромиздат, 1959.
15. Ярославский З.Я. Исследования электрокоагуляторов для очистки воды. // В тр. ВНИИГ, т. 43. – М.: Колос, 1965.
16. Ярославский З.Я. Исследования работы электролитических коагуляторов небольшой производительности. // В тр. ВНИИГ, т.45. – М.: Колос, 1965.
17. Повх И.Л., Бычин Н.А. Результаты исследования электрокоагуляционного метода очистки шахтовых вод. // Материалы научно-техн. конф. «Прогрессивные методы очистки природных и сточных вод». Сб. 2. – М., 1971.
18. Пономарев В.Д., Тараскин Д.А. Влияние электродной пленки на коагуляцию зелей под действием электрического тока. // Сб.научн. тр. Казахского горно-металлург. ин-та, Геолог. горн. дело. Metallургия, №16. – М., 1959.
19. Пономарев В.Д., Тараскин Д.А. Поведение коллоидных систем при электрокоагуляции. // Сб. научн. тр. Казахского горно-металлург. ин-та. Геолог. горн. дело. Metallургия, № 16, М., 1959.
20. Гершенович Е.М. Эффективная очистка воды электрокоагулированием. – Энергетика, 1980, 1980, с.30-33.
21. Кульский Л.А. Серебряная вода. – К.: Наукова думка, 1971.
22. Николадзе Г.И. Обезжелезивание природных и оборотных вод. М.: Стройиздат, 1978. –160 с.
23. Аппарат для электрической обработки сточных вод. Французский патент, кл. C02с, №1548402, опубл. 28.X.1968.
24. Электролитические способы обработки сточных вод. «Terres et eaux», 23, №64, 1970.
25. Ямаура Тосио, Ояма Хадзимэ, Тэраока Канъити. Электролитическая обработка воды с целью удаления из нее кремнекислоты. Яп. пат. 4236. опубл.26.VI.1957.
26. Цуда Акира. Электролитический метод обработки воды с применением переменного тока. Mem. Fak. Eng. Hiroshima Univ., №2.
27. Яловая Н.П. Исследование процесса электрохимического обескремнивания поверхностных вод. // Вестник БГТУ. – 2003. – №5.
28. Яловая Н.П. Исследование обезжелезивания природных вод электрокоагуляционным методом. // Материалы VIII межд. науч.-метод. конференции «Наука и образование в условиях социально-экономической трансформации общества». – Витебск, ИСЗ им. А.М. Широкова. – 2005.
29. Яловая Н.П., Строкач П.П. Исследование влияния физико-химических, электрических и гидродинамических факторов на процесс обескислороживания поверхностных вод. // Вестник БГТУ. –2004. – №5.
30. Яловая Н.П., Строкач П.П. Исследование электрохимического удаления загрязнений из поверхностных вод. // Вестник БГТУ. –2003. – №5.
31. Яловая Н.П., Строкач П.П. Исследование влияния физико-химических, электрических и гидродинамических факторов на процесс электрокоагуляционного обезжелезивания природных вод. // Материалы V межд. научн. конференции «Сахаровские чтения 2005 года: экологические проблемы 21 века», ч. 2. – Гомель: РНИУП «Ин-т радиологии», 2005.
32. Яловая Н.П., Строкач П.П., Яловая Ю.С. Экологический мониторинг качества воды р. Мухавец. // Тезисы студ. конференции. – Брест, БГТУ. – 2004.