

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ВОДОПОДГОТОВКИ

Клявлин М.С., Бобков О.В., Кузнецов Л.К.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

Рассмотрены предпосылки применения физико-химических и электрокоагуляционных методов в водоподготовке и использование этих методов в настоящее время.

Ключевые слова: методы обработки воды, электрокоагуляционные методы.

Развитие водоподготовки началось с улучшения органолептических показаний воды. С открытием возбудителей инфекционных заболеваний, передаваемых через воду, стало очевидным, что только органолептические показания ещё не могут свидетельствовать о пригодности воды для хозяйственно – питьевых целей. В результате этого возникла необходимость в дополнительных методах обработки воды помимо традиционно используемого отстаивания. Таким методом явилось фильтрование либо через песочный грунт, либо через песчаные фильтры медленного действия.

Эксперименты, проведенные в США, привели к разработке скорых песчаных фильтров, основанных на коагуляционной обработке воды и позволяющих эффективно снижать мутность, и содержание болезнетворных организмов в воде [1,2], что значительно улучшило качество очистки природных и производственных сточных вод [3].

Коагулирование взвешенных и коллоидных частиц содержащихся в воде, с использованием различных форм сульфата алюминия было известно с XVII века. Для очистки воды использовали сульфат алюминия добавляемый в

очищаемую воду в виде раствора. Химические методы очистки природных вод с целью придания им питьевого качества стали применяться с конца XIX века в США. [4].

Так в качестве коагулянта впервые был использован сульфат закиси железа примененный в США в 1903 г. [5]. Совместно с сульфатом закиси железа впоследствии стала использоваться известь, способствовавшая интенсификации процесса хлопьеобразования и осаждения. Первым крупным городом, где использовалась это сочетание реагентов, стали Сент-Луис, Цинцинати и Новый Орлеан [1].

Первоначально в рассматриваемых технологиях коагулянт обычно добавляли в исходную воду после ее поступления в отстойники. Через несколько часов контактирования в отстойнике вода направлялась на скорые песчаные фильтры. Чтобы обеспечить контроль за процессом коагулирования при обработке воды наблюдали за процессом образования хлопьев в отстойнике и добавляли реагент «на глазок».

Другой вехой в истории водоподготовки было использование хлора для обеззараживания воды. Практикуемое в США с начала XX века хлорирование воды обеспечивало значительное снижение количества заболеваний, вызываемых некачественной водой. Такое сочетание коагуляции, отстаивания, фильтрования и обеззараживания позволило уже на ранних этапах водоподготовки обеспечить необходимое качество питьевой воды.

Водоподготовка в нашей стране берет свое начало с постройки первого водопровода в г. Москве [6,7], представляющий собой сооружения для доставки воды от источника к месту потребления с предварительным улучшением качества воды на искусственных песчаных фильтрах медленного действия [8].

Эти фильтры были английского производства, и очищали воду, за счет прилипания взвешенных веществ к поверхности песка в промежутках между

частицами и за счет биологической обработки загрязнении в результате жизнедеятельности микроорганизмов образующих биопленки.

К концу XIX в. промышленность России была представлена следующими основными отраслями — обработка волокнистых веществ; обработка питательных веществ, обработка животных продуктов; деревообрабатывающая промышленность; писчебумажное производство, что вызвало повышенные требования к машинам по обработке этих веществ и продуктов [9].

Для промышленных предприятий того времени, очистка воды обычно включала ее умягчение — для паровых котлов и химических производств, и осветление — для писчебумажной, красильно-отбельной и других производств.

Таким образом, способы очистки воды, применяемые в то время, заключались, главным образом, в коагуляционной обработке воды с отстаиванием и фильтрованием.

Отмеченное вызывало необходимость дальнейшего совершенствования и интенсификации процессов водоподготовки. В связи с этим во второй половине XIX века в США были разработаны и стали использоваться скорые фильтры, оказавшиеся эффективными для снижения мутности и содержания бактерий в воде [10]. Вскоре эти фильтры, благодаря своему быстрому действию, вытесняют распространенные ранее в России английские медленные фильтры.

Традиционным коагулянтом является сернокислый алюминий, обладающий некоторыми недостатками, связанными с повышенной чувствительностью к температуре и рН обрабатываемой воды, образуют избыток рыхлых частиц гидроксида алюминия, вызывающих засорение фильтров, или высокое содержание алюминия в очищенной воде [3]. Применение коагулянтов нового поколения — полиоксихлорсульфата алюминия (ПОХСА), полиоксихлорида алюминия (ПОХА) и некоторых других [11-13], ограничивается высокой стоимостью их производства или импорта. В то же время существует ряд методов электрохимической очистки природных и сточных вод, применение которых в отдельности или при совмещении

процессов обработки, позволяет добиться необходимого эффекта водоподготовки.

Развитие науки и техники и внедрение их достижений в ведущие отрасли промышленности в конце XIX ... начале XX века [14] стимулировало разработку и внедрение прогрессивных технологий и в отраслевую водоподготовку, в частности законы открытые Майклом Фарадеем, определяющие соотношение между массой продукта, образовавшегося на электроде и электрическим зарядом пропущенным через электролит, имеют целый ряд промышленных применений — это извлечение и очистка металлов, нанесение гальванопокрытий, анодирование и получение некоторых химических веществ. Эти законы безусловно были важны для развития промышленности. В то же время с развитием промышленности, возникало много проблем, связанных с очисткой производственных сточных вод, и в этом случае законы Фарадея послужили основой для создания методов электрообработки воды [15,16].

В нашей стране электрокоагуляционные методы обработки и очистки воды получили значительное развитие в 60-е...70-е годы XX столетия [17].

Электрокоагуляцией принято называть процесс прилипания частиц дисперсной фазы к макроскопическим частицам коагулянта, образованного электрохимическим путем. При этом подразумевается, что растворение анодного материала происходит под действием внешнего источника питания. В общем случае процесс следует называть электрохимической коагуляцией [18].

Важным шагом в развитии электрокоагуляции является гальванокоагуляция [13,19]. Данный метод используется для очистки вод содержащих ионы металлов и эмульгированные нефтепродукты [20,21] в оборотных системах водоснабжения химических, металлургических и машиностроительных предприятий.

Известны несколько устройств различной конструкции, использующих в качестве электродов короткозамкнутые элементы (гальванопары). В качестве

электродов наибольшее распространение получили железный и медный скрап или железный скрап и кокс. В результате кратковременного контакта разнородных электродов растворяется железный электрод, ионы железа гидролизуются, образуя хлопья гидроксида железа, сорбирующие на своей поверхности ионы металлов, органические соединения, растворенные и эмульгированные нефтепродукты.

Гальванокоагуляторы можно использовать в широком диапазоне рН от 0 до 14. При подаче кислых сточных вод рН на выходе аппарата возрастает и стремится к нейтральному значению, а в случае щелочных растворов рН на выходе снижается и также стремится к нейтральному значению. Гальванокоагуляторы можно применить при различных концентрациях вредных примесей в очищаемой воде, поскольку процесс обладает способностью саморегулирования. При увеличении количества примесей автоматически возрастает скорость необходимой очистки. В гальванокоагуляторах отсутствует образование газообразных продуктов, что обеспечивает хорошие санитарно-гигиенические условия на станции водоочистки. Нет необходимости вводить какие-либо химические реагенты, что исключает случайное неконтролируемое загрязнение очищенной воды.

В гальванокоагуляторах не только с высоким эффектом извлекаются тяжелые металлы (98...99%), но и происходит умягчение воды за счет образования комплексных солей с участием солей жесткости. В связи с этим нами предлагается применить данный метод для уменьшения содержания солей жесткости в природной воде при ее подготовке для целей локального питьевого водоснабжения.

Следующим этапом развития методов электрообработки воды явились исследования по электрохимическим методам обработки воды проводимые в 90-е годы XX столетия, позволившие создать электрохимический источник энергии, в процессе работы которого происходит частичное растворение анодного материала для образования гидроксида с последующей очисткой воды [17].

На основании этих исследований были разработаны установки применительно к конкретным природным и производственным сточным водам позволяющие повысить эффект их очистки.

Отличие метода электрохимической коагуляции и метода электрокоагуляции состоит в том, что метод электрохимической коагуляции относится к энергосберегающим технологиям. Обработка воды в этом случае заключается в переходе частиц из центров вызывающих разряд к энергетически выгодным для продукта реакции участкам поверхности электродов. Это позволяет перейти от затрат электроэнергии к её генерации. Кроме того, электрохимический метод наиболее перспективен по следующим причинам: в электрохимических коагуляторах пространственно разделены катодная и анодная области, что позволяет реализовывать электрохимическое окисление и восстановление извлекаемых веществ, изменить реакцию среды pH, окислительно-восстановительный потенциал Eh; в электрохимических коагуляторах не проявляются эффекты пассивации и деполяризации; образуется два потока – католит и анолит – за счёт свойств которых возможно нарушение устойчивости дисперсной системы; возможно использование католита в качестве щелочного агента для заводнения нефтяных месторождений; возможна последовательная обработка воды в анодной и катодной камере, что позволяет интенсифицировать процесс растворения анодного электрода; возможно использование кислородсодержащего газа для интенсификации процесса; возможно применение катионоактивных и анионоактивных мембран, что позволит производить обессоливание воды либо извлекать избирательно катионы и анионы загрязняющих веществ; возможно электрохимическое растворение некоторых минералов для подщелачивания воды [16].

Нами разработан метод умягчения природной воды, использующий в качестве электродов короткозамкнутого гальванического элемента дюралюмин и активированный гранулированный уголь. В качестве электролита служит природная вода с растворенными в ней солями жесткости, содержащая ионы натрия, калия, сульфат- и хлорид-ионы.

Взаимодействие электродов гальванопары и химические реакции способствуют интенсивному образованию нерастворимых осадков карбоната кальция и гидроксида магния, а также образованию дисперсных частиц $\text{Al}(\text{OH})_3$. Последние адсорбируют ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} . Таким образом, образуются мицеллы $\{m[\text{Al}(\text{OH})_3] \cdot n\text{OH}^{-1/2(n-x)\text{Ca}^{2+}}\}^{1/2x\text{Ca}^{2+}}$ и $\{m[\text{Al}(\text{OH})_3] \cdot n\text{OH}^{-1/2(n-x)\text{Mg}^{2+}}\}^{1/2x\text{Mg}^{2+}}$. Чем больше таких мицелл, тем меньше ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} остается в воде, что приводит к уменьшению некарбонатной жесткости.

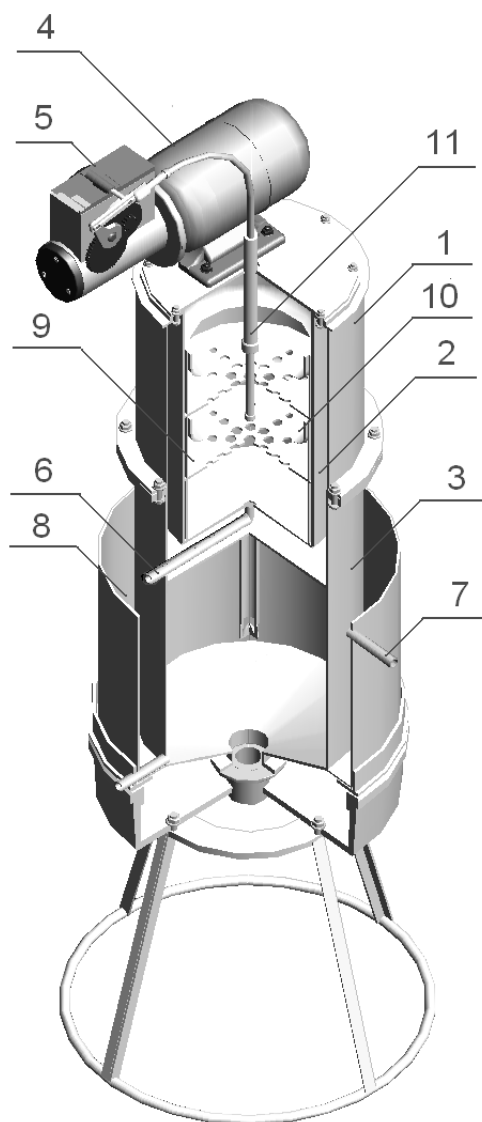


Рис. 1. Устройство гальванокоагулятора для умягчения природной воды

- 1-корпус устройства; 2-верхняя часть корпуса устройства; 3-нижняя часть корпуса устройства;
 4-электродвигатель; 5-редуктор; 6-патрубок для подачи исходной воды; 7-патрубок для отвода отстоянной воды;
 8-желоб для отстоянной воды; 9-емкость с катодным материалом; 10-емкость с анодным материалом;
 11-патрубок для подачи воздуха.

Устройство для гальванокоагуляционного умягчения природной воды показано на рис. 1. Оно состоит из корпуса 1, в верхней части 2 которого расположен гальванокоагулятор, а в нижней части 3 отстойник. Над верхней частью устройства смониторован электродвигатель 4 с редуктором 5. Гальванокоагулятор устройства оборудован патрубком 6 для подачи природной умягчаемой воды, а отстойник оборудован патрубком 7 для отвода из желоба 8 умягченной отстоянной воды. Внутри корпуса находятся емкости с катодным 9 и анодным 10 материалом. Емкости с анодным материалом закреплены на патрубке 11 для подачи воздуха в место контакта электродов электрохимического коагулятора.

Наличие насыпных электродов позволяет: избежать появления мути при использовании углеродсодержащих катодов; обеспечить минимальные энергозатраты для работы механизма взаимодействия электродов для кратковременного разряда в водной среде; постоянно обновлять поверхность соприкосновения электродов путем их взаимного перемещения в оптимальном режиме, изменяющимся в зависимости от исходной жесткости; уменьшить истирание менее прочного материала электрода и обеспечить возможность быстрой замены только катода и только анода путем извлечения кассеты с анодом или емкости с катодом из корпуса гальванокоагулятора; обеспечить доступ кислорода именно в место контакта электродов гальванокоагулятора.

Конструкция гальванокоагулятора позволяет регулировать степень умягчения природной воды за счет изменения частоты вибрации анода при контакте с катодом.

На основе результатов исследований работы пилотных установок предложено аппаратное оформление процесса и конструктивные решения основных узлов и механизмов, а так же регулировка частоты вибрации катодных и анодных областей гальванокоагулятора в зависимости от жесткости и расхода природной воды.

Технологические параметры гальванокоагулятора для умягчения природной воды приведены в таблице 1.

На основании дальнейшего поиска методов интенсификации электрокоагуляции нами предложен принципиально новый подход, основанный на создании электрохимического источника энергии.

ТАБЛИЦА 1

Технологические параметры гальванокоагулятора

Общая жесткость воды, мг-экв/л		Эффект умягчения %	Частота вибрации число в мин.	Производительность, л/ч
До умягчения	После умягчения			
8,0	5,0	37,5	40,0	30,0
12,0	6,5	45,8	40,0	24,0
18,0	9,0	50	40,0	20,0
22,0	10,0	54	65,0	18,0
24,0	11,0	54	65,0	15,0
28,0	13,0	54	65,0	13,0

В процессе работы такого источника происходит частичное растворение анодного материала, что используется для образования соответствующих гидроксидов металла и последующей очистки воды.

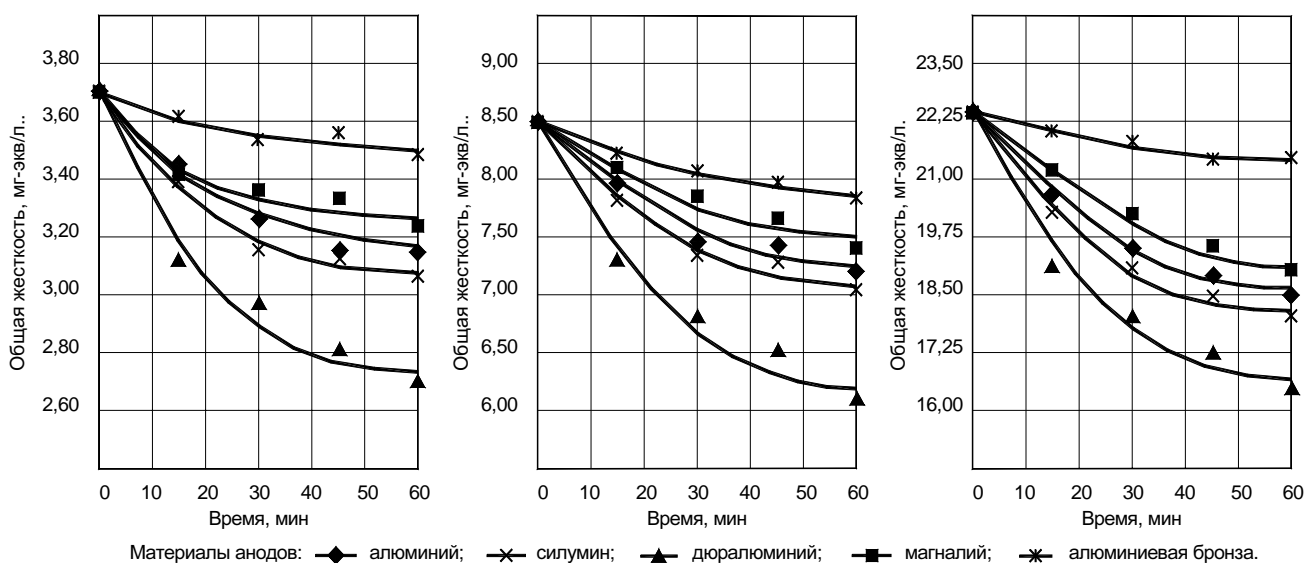


Рис.2. Умягчение природной воды различными материалами анода

Эффект умягчения достигаемый в электрохимической установке определяется рядом обстоятельств: выбором электродной пары анод– катод; кратковременным контактом анода с катодом; доставкой кислорода к месту контакта электродов.

В качестве анодного материала были исследованы алюминий, дюралюминий, силумин, алюминиевая бронза, а в качестве катода — активированные угли марок АГ-3, СКД-515, БАУ - А.

Результаты опытов по умягчению природной воды электрохимической коагуляцией с анодами из алюминия (А), дюралюминия (Д), силумина (С), магналия (М) и алюминиевой бронзы (АБ) представлены на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, дюралюминий показывает лучшее взаимодействие с активным углем для умягчения природной воды, чем алюминий, силумин, магналий и алюминиевая бронза. Вероятно, это происходит по причине наличия локальных коррозионно-активных элементов на поверхности сплавного электрода вносящих дополнительный вклад в растворение алюминия, поскольку дюралюминий это сплав на основе алюминия и меди.

Наиболее эффективным катодом для дюралюминия является активный уголь марки СКД-515, затем по эффективности следует БАУ и только потом активированный уголь марки АГ-3. Активный уголь марки СКД-515 превосходит БАУ и АГ-3 на 15-30%.

Электрохимические источники тока - это устройства, позволяющие осуществлять непосредственное превращение химической энергии в электрическую. На основе различных окислительно-восстановительных процессов можно было бы построить огромное число электрохимических систем. К современным электрохимическим источникам тока предъявляются следующие требования [22]:

1. Возможно большая величина ЭДС. Величину ЭДС источника тока можно рассчитать по законам электрохимической термодинамики. Однако, необходимо учитывать, что по достижении определённой разности потенциалов на электродах источника тока становится возможным протекание реакции с участием молекул растворителя. Так, в водных растворах, когда разность потенциалов между электродами превышает 1,23 В, на одном из

электродов может выделяться водород, а на другом - кислород. Поэтому создание источников тока с водными растворами электролитов и с ЭДС $> 1,23$ В с точки зрения электрохимической термодинамики кажется невозможным. На самом деле, созданы источники тока, использующие водные растворы с ЭДС $> 1,23$ В. Это объясняется тем, что токи обмена реакции выделения водорода и кислорода на ряде электродов малы, т.е. эти электронные процессы протекают с большим перенапряжением. В результате перенапряжения верхняя граница ЭДС источников тока с водными растворами электролитов отодвигается до 2,0-2,2 В. Таким образом, перенапряжение, которое вызывает непроизводительные затраты энергии при электролизе воды для получения водорода и кислорода, позволяет увеличить ЭДС источника тока почти вдвое по сравнению с предсказываемым термодинамикой теоретическим значением.

2. Возможно меньшее отклонение разности потенциалов между электродами от ЭДС. при работе источников тока. Это отклонение вызвано поляризацией электродов источника тока и падением напряжения на его внутреннем сопротивлении $R_{\text{внутр}}$. Следовательно, напряжение U на клеммах источника тока, находящегося под нагрузкой, равно

$$U = E - |\Delta E_{\text{к}}| - |\Delta E_{\text{а}}| - I R_{\text{внутр}},$$

где $\Delta E_{\text{к}}$ и $\Delta E_{\text{а}}$ – поляризации катода и анода соответственно; I – ток. Таким образом, важной характеристикой источника тока является зависимость между U и I . Увеличение U достигается двумя путями. С одной стороны стремятся снизить поляризацию анода и катода за счет создания условий, при которых электрохимические процессы протекают максимально быстро. С другой стороны, стремятся максимально уменьшить внутреннее сопротивление источника тока, что достигается особенностями конструкции источника (например, уменьшением межэлектродного расстояния), применением электролитов с высокой электропроводностью и т. д.

3. Большая удельная емкость источника тока, т. е. большой запас электричества в расчете на единицу массы или объема, Эту характеристику

определяют при помощи кривых разряда, представляющих зависимость между напряжением источника тока и временем разряда при $I = \text{const}$.

4. Максимально высокая удельная мощность, т. е. максимально большое количество энергии, отдаваемой в единицу времени единицей массы или объема источника тока. Одним из важных факторов, определяющих эту величину, является поверхность соприкосновения материала электродов с раствором. Поэтому часто применяют губчатые или пористые электроды с большими поверхностями. Применение таких электродов позволяет, кроме того, снизить поляризацию электродов, поскольку при данном I уменьшается плотность тока.

5. Максимально низкий саморазряд. Саморазрядом называют потерю емкости источником тока при разомкнутой цепи. Одной из причин саморазряда служит образование на электродах локальных элементов (вследствие присутствия загрязнений в электролите или в материалах электродов, неоднородности последних и др.), работа которых приводит к бесполезному расходованию электрохимически активных веществ и к разрушению электродов.

Поляризация каждого из электродов представляет собой изменение потенциала на границе электрод - раствор по сравнению с его равновесным значением, вызванное прохождением электрического тока. Электрический ток, в свою очередь, связан с протеканием электродного процесса (фарадеевский ток) и с зарядением двойного слоя (ток заряжения). Если свойства поверхностного слоя не изменяются во времени, то протекающий через электрод ток определяется только скоростью самого электродного процесса и размерами электродов. В этих условиях плотность тока служит мерой скорости электрохимической реакции. Поляризация электрода обусловлена конечной скоростью электрохимического процесса, а потому она является функцией плотности тока: $\Delta E = \Delta E(i)$. Функциональная зависимость ΔE от i называется поляризационной характеристикой. Задача электрохимической кинетики

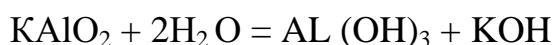
заключается в установлении общих закономерностей, которым подчиняются поляризационные характеристики, для сознательного регулирования скорости электродных процессов. Эта задача чрезвычайно важная, поскольку уменьшение поляризации при заданной плотности тока позволяет существенно повысить КПД использования электрохимических систем.

В отличие от обычной гомогенной химической реакции, протекающей во всех точках объема раствора, где есть реагирующие вещества, электрохимическая реакция идет на границе раздела между электродом и раствором, т.е. является реакцией гетерогенной. Отсюда следует, что любой электродный процесс всегда имеет ряд последовательных стадий: сначала реагирующее вещество должно подойти к электроду, затем должна произойти собственно электрохимическая стадия, связанная с переносом электронов или ионов через границу раздела фаз (стадия разряда – ионизации), и, наконец, образовавшиеся продукты реакции должны отойти от поверхности электрода, чтобы освободить место для новых порций реагирующего вещества. Первая и вторая стадии имеют одинаковые закономерности и называются стадиями массопереноса. Стадии массопереноса и разряда – ионизации присутствуют во всех без исключения электродных процессах. Помимо этих стадий при протекании электродных реакций встречаются также и другие. Так, часто электродные процессы осложняются химическими реакциями в объеме раствора или на поверхности электрода, в которых может участвовать исходное вещество или продукт электрохимической реакции.

В ходе электрохимического процесса может происходить перемещение частиц по поверхности электрода (стадия поверхностной диффузии) от центров, на которых идет разряд, до некоторых других, где продукту реакции находится энергетически наиболее выгодно. Если поверхность электрода несет заряд, одинаковый с зарядом реагирующей частицы, то электрическое поле двойного слоя препятствует абсорбции этой частицы и необходимо

учитывать стадию вхождения реагирующей частицы в двойной электрический слой.

Известны [23] электрохимические источники тока с алюминиевыми анодами, которые не получили распространения из-за коррозии и пассивации алюминия. Однако, алюминиевые аноды весьма перспективны при создании электрохимических коагуляторов. Электрохимические коагуляторы могут быть созданы по типу полупитивных элементов. Когда один из реагентов закладывается при изготовлении элемента, а второй подается во время работы элемента. Таким реагентом может быть жидкость или газ. Наиболее простые токообразующие реакции, реализованные в электрохимическом коагуляторе, имеют вид:



Третье поколение коагуляторов наиболее перспективно по следующим причинам: метод электрохимической коагуляции относится к энергосберегающим технологиям, т.к. позволяет перейти от затрат электроэнергии к её генерации; в электрохимических коагуляторах пространственно разделены катодная и анодная области, что позволяет реализовывать электрохимическое окисление и восстановление извлекаемых загрязняющих веществ, изменить реакцию среды pH, окислительно-восстановительный потенциал Eh; в электрохимических коагуляторах не проявляются эффекты пассивации и деполяризации; образуется два потока – католит и анолит – за счёт свойств которых возможно нарушение устойчивости дисперсной системы; возможно использование католита в качестве щелочного агента для заводнения нефтяных месторождений; возможна последовательная обработка воды в анодной и катодной камере, что позволяет интенсифицировать процесс растворения анодного электрода; возможно использование кислородсодержащего газа для интенсификации процесса; возможно применение катионоактивных и анионоактивных мембран, что

позволит производить обессоливание воды либо извлекать избирательно катионы и анионы загрязняющих веществ; возможно электрохимическое растворение некоторых минералов для подщелачивания воды.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы: - метод электрохимической коагуляции является перспективным методом умягчения природных вод; - регулирование процесса обработки воды вибрацией электродов доступом кислорода в место их контакта; - отсутствие необходимости применения для процессов очистки воды реагентов; - возможность использования в качестве электродов отходов производства; - низкие энергозатраты на проведение основного технологического процесса обработки воды; - простота аппаратного оформления и эксплуатационного обслуживания процесса очистки.

Литература

1. Руководство AWWA M 37 Технологический контроль процессов коагулирования и фильтрования, (Operational Control of Coagulation and Filtration Processes), 2000 г., 103 с.
2. Стандарт AWWA B403-98, Aluminum Sulfate – Liquid, Ground or Lump, (Сульфат алюминия – жидкий, измельченный, комовой), 1998 г., 23 с;
3. Оценка эффективности применения различных типов коагулянтов для очистки волжской воды. / С. В. Гетманцев, А. А. Рученин, С. В. Снигирев, Ф. И. Чюрюков. // Водоснабжение и санитарная техника. 2004 г. с. 17;
4. Стандарт AWWA B453-01, Polyacrilamide, (Полиакриламид), 2001 г. 39 с;
5. Стандарт AWWA B402-00, Ferrous Sulfate, (Сульфат закиси железа), 2000 г, 18 с;
6. Путь воды в столицу/ Д. Гриневская // Вокруг света. 2004 г. с.139;
7. Малая Советская энциклопедия т.6, 1930 г., с. 220;
8. Малая Советская энциклопедия т.2, 1930 г., с. 216;
9. Россия: Энциклопедический словарь. – Л.: Лениздат, 1991. – 922 с;
10. Стандарт AWWA B100, Granular Filter material, (Гранулированный фильтрующий материал), 2001 г, 47 с;
11. Расчет экономического эффекта от применения коагулянтов./ Р. И. Сафин, С. В. Базит, С. В. Гетманцев, Ф. И. Чуриков. Водоснабжение и санитарная техника.с.21.

12. Особенности механизма коагуляции и строения полиоксихлорида алюминия / С. В. Гетманцев, А. В. Сычев, Ф. И. Чуриков, С. В. Снигирев, с. 25.
13. Повышение эффективности очистки производственных сточных вод с применением полиоксихлоридов алюминия /Н.С. Серпокрьлов, Е.В. Вильсон, Т.В. Клименко // Водоснабжение и санитарная техника. 2004. №1.
14. Фримантл М. Химия в действии. – М.: Мир.- Ч. 1 – С.482;
15. Яковлев С.В., Краснобородько И.Г., Рогов В.М., Технология электрохимической очистки воды. –Л.: Стройиздат, 1987. – 312 с.
16. Назаров В.Д., Гурвич Л.М., Русакович А.А. Водоснабжение в нефтедобыче—Уфа: ООО «Виртуал»—2003.—504 с.
17. Назаров В.Д., Клявлин М.С., Бобков О.В., Кузнецов Л.К. Тенденции развития водоподготовки от физико- химических до электрокоагуляционных процессов // Башкирский химический журнал. – 2005. - Т. 11, №5.-С. 97-99.
18. Назаров В.Д., Бобков О.В., Клявлин М.С., Кузнецов Л.К. Применение электрохимических методов очистки природных вод-//Материалы Республиканской научно – практической конференции- «Водохозяйственный комплекс Республики Башкортостан: «Экологические проблемы, состояние, перспективы»», Уфа, 2005.- с. 130.
19. А. С. 372182, СССР МКИ С 02с5/12. Устройство для очистки сточных вод./ Гузов А. В., Кропоткин И. У., Никоноров И. Ф. И др. // БИ – 1973 - №13.(142)
20. А. С. 952756 СССР, МКИ СО2 А 1/46. Способ очистки сточных вод. //Пржегорлинский В. И., Иванишвили А. И./ БИ – 1982 - № 31 с. 113.
21. Очистка фильтрационных вод полигонов захоронения ТБО методом гальванокоагуляции, Я. И. Вайсман, И. С. Глушанкова, Л.В. Рудакова, Я. С. Шишкин, ВСТ №8, 2003, с. 33.
22. Дамаскин Б. Б, Петрий О. А. Основы теоретической электрохимии – М: Высшая школа – 1978, 239с.
23. Чизмаджев Ю. А., Чирков Ю. Г. Теория пористых газовых электродов. // Сб. Топливные элементы – М.: Наука , с. 5 – 16.