

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИОННОГО СПОСОБА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ



Селицкий Г. А.,
НПФ «Эко-проект», г. Екатеринбург

Сточные воды, образующиеся на предприятиях цветной металлургии, имеют химический состав, который определяется видом перерабатываемого сырья и технологией его обработки. Наиболее характерными ингредиентами-загрязнителями сточных вод цветной металлургии являются ионы тяжелых металлов: медь, цинк, никель, хром, кобальт и другие.



Защита водного бассейна от загрязнения промышленными сточными водами наиболее полно реализуется при внедрении оборотных циклов водоснабжения. Однако организация оборотного водоснабжения с использованием сточных вод на предприятии возможна только при условии их глубокой очистки от токсичных ингредиентов.

В настоящее время очистку сточных вод от ионов тяжелых металлов на большинстве предприятий ведут с помощью реагентов, из которых наибольшее применение находят известь, серноокисное закисное железо и бисульфит натрия.

Реагентные методы очистки сточных вод позволяют довести содержание, ионов тяжелых металлов в растворе до величин сопоставимых с ПДК для воды водоемов санитарно-бытового водопользования. Вместе с тем, использование реагентов для вывода ионов тяжелых металлов из жидкой фазы приводит к увеличению общего соледержания очищенной воды и затрудняет ее использование в оборотных системах водоснабжения предприятий.

В последние годы большое внимание уделяется разработке и внедрению в практику электрокоагуляционного способа очистки производственных сточных вод с использованием анодов, подвергающихся электрохимическому растворению.

Электрохимический способ, в частности электрокоагуляция, находит все более широкое применение в области водоподготовки в тех случаях, когда традиционные способы механической и физико-химической обработки воды оказываются недостаточно эффективными.

Основными преимуществами электрокоагуляции являются:

- компактность и простота эксплуатации установки для осуществления процесса электрокоагуляции;
- отсутствие реагентного хозяйства.

Применение данного метода предпочтительно в первую очередь на предприятиях в условиях острой нехватки производственных площадей; на предприятиях, расположенных в отдаленных и бездорожных районах; при обработке сточных вод, расход которых не превышает 50–80 м³/час.

Исследования по электрокоагуляции успешно ведутся в Японии, США, Франции, Польше и в других странах. [1-4].

В странах бывшего Советского Союза работы в этом направлении были начаты еще в 1924 году. Исследования А.Д. Абрамкина, А.И. Изъюровой, Л.А. Кульского, Е.Ф. Кургаева, И.Н. Овчинкина, П.И. Пискунова, С.В. Яковлева, З.Я. Ярославского и других ученых показали, что электрокоагуляция — высокоэффективный и экономичный метод очистки воды для технологических целей и питьевого водоснабжения [5-9].

На протяжении многих лет метод электрокоагуляции с использованием алюминиевых электродов применялся как способ электрохимического ввода в обрабатываемую жидкость коагулянта — гидроксида алюминия.

Впервые в работах авторов [10,11] было показано, что при электрокоагуляционной обработке сточных вод с использованием железных электродов можно осуществлять восстановление шестивалентного хрома и проводить соосаждения ионов тяжелых металлов на гидроксиде железа.

Метод электрокоагуляционного восстановления шестивалентного хрома был внедрен в качестве локального способа очистки хромсодержащих сточных вод на многих предприятиях цветной металлургии и машиностроения бывшего СССР.

Несмотря на большое количество исследований, посвященных процессу электрокоагуляции, многие вопросы остаются еще нерешенными. Пока отсутствуют обоснованные рекомендации по применению электрокоагуляционного метода для очистки различных видов промышленных сточных вод, а многие из действующих установок имеют существенные недостатки.

Промышленные сточные воды, образующиеся на предприятиях цветной металлургии, являются электролитом, так как присутствующие в них минеральные соли, свободные кислоты или щелочи в определенной степени диссоциированы на ионы. При погружении в такую жидкость электродов, к которым подведено напряжение достаточной величины, начинается перенос электрического тока движущимися к электродам ионами в электролите и электронами во внешней цепи.

В случае применения растворимых электродов электродный процесс сопровождается совокупностью электрохимических реакций, скорость которых определяется общим значением потенциала на границе металл/раствор, составом раствора и условиями диффузии компонентов или продуктов реакции в растворе.

В результате электролиза происходит процесс восстановления или окисления на электродах компонентов, входящих в состав электролита. В переносе тока принимают участие все находящиеся в воде ионы, а также коллоидные и взвешенные частицы, несущие заряд.

Общую реакцию анодного растворения металла, если образуются простые гидротированные ионы, можно записать в виде уравнения (9-10)



Растворение металлов происходит как за счет внешнего тока (электролитическое растворение), так и в результате взаимодействия с электролитом (химическое растворение).

В данной статье приводятся сведения об электрохимических реакциях, которые протекают на железных электродах, т.к. для очистки промышленных сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов, в основном применяют электрокоагуляторы с железными электродами.

Согласно теории электрохимической коррозии (II), при использовании железных электродов в процессе электрокоагуляционной очистки воды могут протекать следующие наиболее вероятные реакции:

— на аноде:

переход ионов железа в раствор (анодное растворение)



— на катоде:



Кроме того, на катоде могут проходить реакции восстановления катионов (железа; меди), анионов (бихромат-ионов),

Наряду с электрохимическим растворением железного анода в определенных условиях могут протекать процессы его химического растворения. Данный процесс возможен только при определенной концентрации в воде свободной кислоты.

В этих условиях выход железа по току может превышать 100%.

При электрокоагуляционной очистке воды на процесс растворения железных электродов оказывают влияние физико-химические, электрические и гидродинамические факторы: активная реакция среды, её солевой состав, температура, химический состав железных (стальных) электродов, плотность тока, частота смены полярности, скорость движения воды в межэлектродном пространстве и др.

Исследованиями целого ряда авторов [12-17] установлено, что снижение величины pH и увеличение солевого содержания обрабатываемой воды приводит к резкому увеличению скорости растворения железных анодов.

Использование анодов из легированной стали значительно снижает скорость перехода железа в раствор.

При этом отмечается, что увеличение содержания углерода в стальном аноде положительно сказывается на скорости его растворения.

Существенное значение при очистке воды электрокоагуляцией имеет выбор оптимальной плотности тока. Наиболее выгодной может быть работа электрокоагулятора при высоких плотностях тока, так как при этом более интенсивно используется их емкость и рабочая поверхность электродов. Однако с повышением плотности тока возрастают поляризационные явления и пассивация электродов, что приводит к возрастанию напряжения и потерям электроэнергии на побочные процессы.

Наступление пассивного состояния железного анода связано с образованием на его поверхности окисной пленки или плотного осадка гидроокиси железа. Для предотвращения этих явлений предлагается менять полярность электродов в зависимости от плотности тока через 15-120 мин.

Ряд исследователей отмечает [18,19], что с увеличением скорости движения воды увеличивается количество растворенного анодного материала, предотвращается образование на нем окисных пленок и осадков, уменьшается поляризация и расход электроэнергии. Такой эффект объясняется тем, что при увеличении скорости движения воды в электродном пространстве электрокоагулятора происходит вынос хлопьев гидроокиси металлов, уменьшается толщина диффузионного приэлектродного слоя, а также резко сокращается газо-накопление в жидкости.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИИ В ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ХРОМА, МЕДИ, НИКЕЛЯ И ЦИНКА

На предприятиях цветной металлургии хромосодержащие сточные воды образуются в основном на заводах по обработке цветных металлов, где для травления и пассивации прокатанного металла применяют электролиты, в состав которых входят соединения шестивалентного хрома.

Концентрация хрома в сточных водах предприятий данной подотрасли находятся в пределах 5-80 мг/л.

Для обезвреживания хромосодержащих сточных вод наибольшее распространение получили реагентные методы. Процесс очистки данного вида сточных вод ведут в две стадии: восстановление шестивалентного хрома до трехвалентного и осаждение последнего в виде гидроксида щелочным реагентом (щелочью, содой или известью).

Восстановление шестивалентного хрома, который находится в сточной воде, проводят в кислой среде при pH=2-3. В качестве восстановителя используют сернистый газ, сульфит и бисульфит натрия, сернистый натр и серноокислое закисное железо. Применение реагентов для восстановления и осаждения хрома ведет к увеличению общего содержания обезвреживаемых сточных вод и затрудняет их дальнейшее использование.

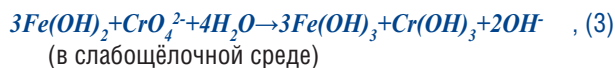
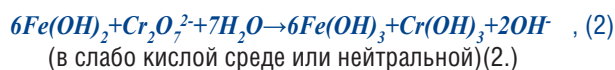
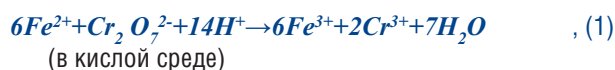
Кроме реагентного способа для обезвреживания хромосодержащих сточных вод применяют ионообмен и электродиализ.

Все перечисленные методы требуют применения дорогостоящих реагентов, сложных и громоздких очистных сооружений.

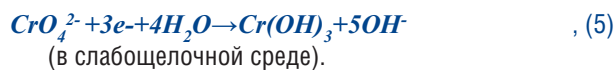
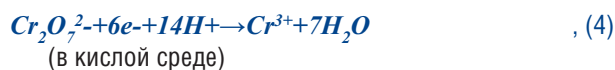
В последнее время большое внимание уделяется электрокоагуляционному методу очистки хромосодержащих сточных вод. Электрокоагуляция, как указывалось выше, является мобильным методом, позволяющим вести процесс очистки воды от хрома в широком диапазоне pH (от 2 до 9) с меньшими (по сравнению с другими способами очистки) капитальными и эксплуатационными затратами.

Одно из первых исследований в нашей стране по восстановлению хромового ангидрида за счет анодного растворения железа было выполнено в Казанском государственном университете [10]. Применительно к очистке сточных вод от хрома и других окислителей метод электрокоагуляции был впервые исследован и затем успешно применен на производстве научно-промышленным объединением «Уралэнергоцветмет» под руководством автора настоящей публикации [17, 18].

Очистка хромосодержащих сточных вод в электрокоагуляторе с железными электродами основана на химическом восстановлении бихромат и хромат ионов ионами Fe^{2+} , образующимися при электролитическом растворении анодов и в результате катодного восстановления $Fe^{3+}+e^{-}\rightarrow Fe^{2+}$, а также гидроакисью железа $Fe(OH)_2$, образующейся в обрабатываемой воде при взаимодействии Fe^{2+} и OH^{-} ионов при pH >7,5, согласно следующим уравнениям химических реакций:



Кроме того, может происходить восстановление $Cr_2O_7^{2-}$ и CrO_4^{2-} ионов в результате катодных электрохимических процессов:



В соответствии с уравнениями (1-3), на восстановление 1 г хрома в сточной воде, обрабатываемой в электрокоагуляторе, расходуется 3,22 г железа, на что тратится по закону Фарадея — 3,09 А/ч. электричества.

При электрокоагуляционной обработке хромосодержащих сточных вод, как это уже отмечалось выше, имеет место не только электрохимическое растворение железного анода, но и его чисто химическое растворение в соответствии с уравнением:



Образовавшиеся при этом ионы двухвалентного железа также участвуют в восстановлении шестивалентного хрома, снижая тем самым расход электроэнергии на обработку сточных вод.

Исследованиями института "ВОДГЕО" установлено, что при величине pH > 3 может иметь место пассивация поверхности стальных анодов под действием хроматов, нитратов и фосфатов, вследствие чего резко снижается выход железа по току. При исходной концентрации шестивалентного хрома в сточных водах до 100 мг/л и отсутствии в них других ионов, вызывающих пассивацию поверхности анодов (NO_3^{-1} · PO_4^{3-}) последняя не имеет места при соотношении исходных концентраций



Во всех случаях неблагоприятных соотношений между концентрациями анионов, предотвращающих и вызывающих пассивацию стальных анодов, к сточным водам рекомендуется добавлять хлористый натрий в количествах, обеспечивающих достижение вышеуказанных соотношений.

Как показали исследования, обычно величина напряжения на ванне электрокоагулятора не превышает максимально допустимого напряжения для используемых источников постоянного тока и находится в пределах 6-12 В. В тех случаях, когда напряжение на электролизере является предельным для используемого источника тока, а величина тока еще не достигнута для получения требуемой производительности установки, рекомендуется вводить в обрабатываемую сточную воду раствор хлорида натрия.

Практика работы электрокоагуляционных установок показывает, что величина тока, пропускаемого через сточные воды, определяется количеством электричества, которое необходимо для полного восстановления шестивалентного хрома, и выбранным временем обработки воды в аппарате.

Время обработки выбирается таким, чтобы за период пребывания воды в электрокоагуляторе в раствор перешло такое количество железа, которого бы хватило для восстановления шестивалентного хрома, содержащегося в обрабатываемом объеме сточных вод. Вместе с тем, скорость анодного растворения железа зависит от выбранной плотности тока. В целом ряде работ [12,20] указывается, что очистку сточных вод от шестивалентного хрома следует вести в интервале плотностей тока от 50 до 200 а/м².

Как уже отмечалось выше, увеличение плотности тока приводит к сокращению времени электрохимической обработки сточных вод, но в то же время из-за роста напряжения на ванне электрокоагулятора увеличивается удельный расход электроэнергии. По конструктивным соображениям, чтобы не применять громоздкие электрокоагуляторы и выпрямители постоянного тока, время обработки сточных вод рекомендуется выбирать в интервале от 2 до 15 мин [16,21].

В ходе электрокоагуляционной очистки сточных вод происходит повышение величины pH. Это объясняется тем, что количество образующихся гидроксид ионов превалирует над количеством ионов водорода, которые образуются при гидратации ионов Fe^{3+} и Cr^{3+} [23].

В случае содержания в обрабатываемой воде ионов тяжелых металлов (меди, цинка и никеля) последние осаждаются в виде гидроокисного осадка, при достижении величины pH начала гидратообразования. Осаждению тяжелых металлов из воды способствуют и другие процессы, происходящие в электрокоагуляторе с железными электродами.

Так, переходящие в раствор за счет анодного растворения ионы железа гидратируются с образованием гидроокиси и гидрозакиси железа, которые адсорбируют ионы цветных металлов и осаждаются вместе с ними.

Целым рядом авторов выполнены исследования по определению основных технологических параметров процесса осаждения ионов тяжелых металлов из сточных вод в ходе их обработки их в электрокоагуляторе с железными электродами [18-20].

Установлено, что эффективность очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов методом электрокоагуляции определяется следующими условиями:

1. достижением величины pH начала гидратообразования ионов тяжелых металлов, находящихся в обрабатываемой воде;
2. переходом в раствор такого количества железа, которого было бы достаточно для соосаждения присутствующих в воде ионов тяжелых металлов.

Так, эффект очистки цинкосодержащих растворов и сточных вод методом электрокоагуляции от цинка зависит от количества электричества, анодного выхода по току железа и объема образующегося гидроксида железа. Ориентировочные интервалы удельных затрат железа на очистку сточных вод от ионов тяжелых металлов методом электрокоагуляции приведены в работах целого ряда исследователей [26].

Расход железа в граммах на 1 г осаждаемого иона при электрокоагуляционной очистке воды от меди составляет 3-3,5, от цинка - 2-3, от никеля - 5-6. Эти данные получены при обработке сточных вод с pH 4-6. Большинство исследователей подчеркивают, что при исходной величине pH < 2 электрокоагуляционная очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов становится

технически и экономически неоправданным процессом из-за большого расхода железа [16,20].

Удаление ионов тяжелых металлов из раствора при электрокоагуляции может происходить не только за счет гидратации и сорбции на поверхности гидроокиси железа, но и за счет образования трудно растворимых комплексных соединений тяжелых металлов с железом. На этом принципе в Японии разработан процесс очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов [22-24]. На первой стадии вода подвергается обработке в электролизере с железными электродами, а затем сточную воду подщелачивают и вводят флокулянты. Осадок сгущают и подвергают аэрации для образования ферритов. Связывая ионы тяжелых металлов в ферриты, можно снизить концентрацию последних в сточных водах до 0,01-0,001 мг/л.

Технологический процесс электрокоагуляционной очистки сточных вод от шестивалентного хрома и ионов тяжелых металлов имеет следующие особенности:

- восстановление шестивалентного хрома идет не только ионами двухвалентного железа, но и за счет электрохимического восстановления на катоде;
- при величине $pH < 3$ воды, обрабатываемой в электрокоагуляторе, выход железа по току в анодном процессе превышает 100%, что связано не только с электрохимическим, но и с чисто химическим растворением материала анода;
- в диапазоне величины pH от 4 до 6 удельный расход железа при электрокоагуляционном восстановлении хрома колеблется от 2,8 до 3,2. весовых частей на одну весовую часть хрома;
- при плотности тока до 3 а/дм² и концентрации хрома в растворе до 200 мг/л (в отсутствии других ионов пассиваторов) заметной поляризации железного анода в процессе электрокоагуляции не наблюдается;
- осаждение ионов цветных металлов из раствора возможно только при величине $pH > 4$; глубина очистки воды от ионов цветных металлов электрокоагуляцией уменьшается в соответствии с рядом $Cu > Zn > Ni$
- удельный расход железа при электрокоагуляционной очистке воды от ионов цветных металлов составляет 5 весовых частей на каждую весовую часть в пересчете на суммарную концентрацию ионов меди; цинка и никеля;
- за счет ферритизации гидроксидов железа, образующихся при электрокоагуляционной обработке воды, достигается повышение степени ее очистки от ионов цветных металлов и снижается расход щелочного реагента на подщелачивание;

На основании результатов исследования процесса анодного растворения железа составлена номограм-

ма определения параметров технологического режима обработки хромосодержащих промышленных сточных вод, которая приведена на рис.1

Использование данной номограммы позволяет с большей точностью определять все необходимые исходные данные для расчета электрокоагулятора применительно к очистке определенного состава сточных вод. Существующая методика расчета, которая изложена в СНиП 2.04.03-85, не учитывает многих факторов (пассивация электродов, солевой состав обрабатываемой воды, гидродинамика потока и др.) Так как номограмма составлена на основании исследований широкого диапазона параметров обработки хромосодержащих стоков, то исходные данные для определения параметров электрокоагуляции с ее помощью являются более надежными. Ниже приведено краткое описание по использованию номограммы для получения исходных данных для расчета параметров электрокоагуляционной обработки сточных вод.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПО НОМОГРАММЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОБРАБОТКИ ХРОМОСОДЕРЖАЩИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Для определения по номограмме параметров технологического режима обработки хромосодержащих стоков с определенным часовым расходом и содержанием шестивалентного хрома выполняются следующие операции.

На шкале «концентрация хрома (У1)» находится точка «а», соответствующая концентрации шестивалентного хрома в стоке. Затем проводится вертикальная прямая до пересечения с линией, соответствующей объему стоков за 1 час (точка «в»). От точки «в» необходимо провести горизонтальную прямую до шкалы «расход железа». Точка «о» указывает количество железа, необходимое для обработки хрома в стоке.

Для того, чтобы определить силу тока на ванне, требуется предварительно учесть величину pH стока. С этой целью на прямой «вс» (или на ее продолжении) находится на шкале «величина pH » точка «д», соответствующая величине pH стоков. Из точки «д» в соответствии с наклонной сеткой проводится прямая до пересечения с вертикальной линией (точка «е»). Из точки «с», показывающей расход железа, необходимо провести прямую через точку «е» до пересечения с линией соответствующей принятой плотности тока (точка «f»).

Вертикальная прямая до шкалы «площадь анодов» в точке «R» показывает рабочую площадь анодов в электрокоагуляционной ванне. Горизонтальная прямая из точки «f» до шкалы «сила тока», соответствующей принятой плотности тока, указывает в точке «h» силу тока

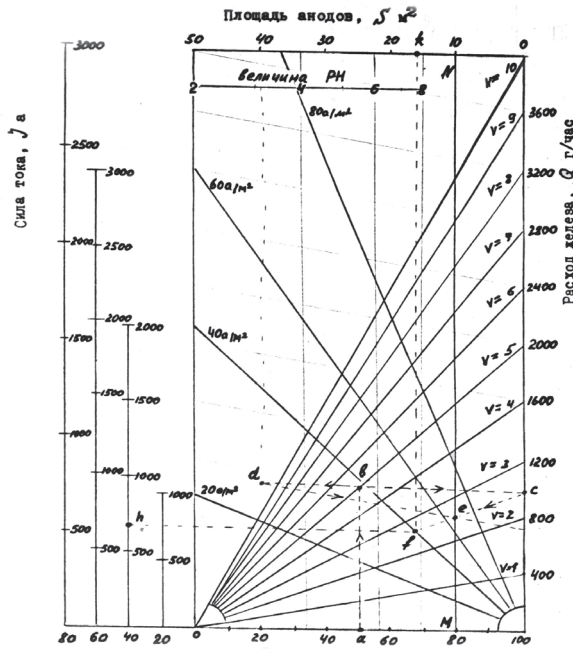


Рис.1
Номограмма определения параметров технологического режима обработки хромосодержащих промышленных стоков. Плотность тока, 1 а/м². Концентрация хрома (6+), г/м³

на электрокоагуляционной ванне при обработке хромосодержащих стоков.

Кроме того, по данным номограммы определена формула для определения количества железа, переходящее при электролизе в раствор с 1 м² площади с учетом величины рН раствора и плотностей тока:

$$q_{Fe} = 17,2 + 1,62i_a - 4,6 pH \text{ (г/м}^2 \text{ час)}$$

(формула справедлива для величин рН от 2 до 8 и плотности тока от 40 до 120 а/м²).

Таким образом, использование номограммы позволяет с большей точностью определить технологические параметры процесса электрокоагуляции: необходимую силу тока, расход железа, получаемого за счет растворения анодов, и требуемую площадь железных электродов, которые должны быть установлены в электрокоагуляторе.

После определения основных технологических параметров процесса электрокоагуляции расчет конструкции электрокоагулятора выполняется с использованием стандартной методики, которая приведена в СНиПе 2.04.03-85.

Пример: концентрация шестивалентного хрома 50 г/м³ (точка «а»). Объем стоков составляет 5 м³/час (точка «в»), величина рН стоков 3 (точка «д»). Необходимое для обработки количество железа -1000 г/час (точка «с»). При плотности тока, равной 40 а/м² (точка «е»), сила тока на ванне составляет 640 а (точка «г»), а площадь анодов — 16 м² (точка «к»).

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ХРОМСОДЕРЖАЩИХ СТОКОВ

Исходные данные:

1. Объем стоков, обрабатываемый за 1 час работы установки — и м³/час.
2. Концентрация шестивалентного хрома — С г/м³.
3. Удельный расход железа на 1 вес. часть хрома — 4 вес. части.
4. Величина рН обрабатываемых стоков — 2-8.
5. Анодная плотность тока при обработке хромосодержащих стоков — i=(40-120) а/м².

Расчет силы тока на установке:

1. Количество шестивалентного хрома, которое необходимо восстановить до трехвалентного.

$$Q_{Cr} = C \text{ г/м}^3 \cdot u \text{ м}^3/\text{час (г/час)}$$

2. Количество железа, необходимое для обработки хрома

$$Q_{Fe} = 4 \cdot C \cdot u \text{ , (г/час)}$$

3. Количество железа, переходящее при электролизе в раствор с 1 м² площади с учетом величины рН раствора и плотностей тока:

$$q_{Fe} = 17,2 + 1,62i_a - 4,6 pH \text{ (г/м}^2 \text{ час)}$$

(формула справедлива для величин рН от 2 до 8 и плотности тока от 40 до 120 а/м²).

4. Рабочая поверхность анодов в электрокоагуляционной ванне:

$$S_a = \frac{Q_{Fe}}{q_{Fe}} = \frac{4Cu}{17,2 + 1,62i_a - 4,6 pH} \text{ , м}^2$$

5. Сила тока на ванне при обработке хромистых стоков

$$I = i_a S_a = \frac{4Cui_a}{17,2 + 1,62i_a - 4,6 pH} \text{ , А}$$

Расчет габаритов электрокоагуляционной установки

1. Площадь одного электрода (l¹ * h¹)=S₁, м²
2. Количество анодов

$$n_a = \frac{S_a}{S_1}$$

3. Количество пакетов в ванне R, шт.
4. Количество анодов в пакете, шт.

$$n_{1a} = \frac{n_a}{R}$$

5. Количество электродов в пакете, шт.

$$n_1 = \frac{2n_a}{R} + 1, \text{ шт}$$

6. Общее количество электродов в ванне, шт.

$$n_{\text{общ}} = \left(\frac{2n_a}{R} + 1\right)R, \text{ шт}$$

7. Расстояние между электродами b принять не более 30мм.

8. Толщина электрода d мм.

9. Ширина пакета электродов

$$d_1 = \left(\frac{2n_a}{R} + 1\right)\delta + \frac{2n_a}{R}b, \text{ мм}$$

10. Расстояние между пакетом электродов и стенкой ванны d_2 , мм.

11. Ширина электрокоагуляционной ванны

$$d = d_1 + 2d_2 = \left(\frac{2n_a}{k} + 1\right)\delta + \frac{2n_a}{k}b + 2d_2$$

12. Расстояние между пакетами электродов и торцевой стенкой ванны l_3 , мм.

13. Длина электрокоагуляционной ванны $l = R l_1 + l_2 (R-1) + 2 l_3$, мм.

14. Высота электрода над уровнем электролита h_2 , мм.

15. Высота ванны $H = h_1 + h_2$, мм.

16. Общий объем ванны $V_{\text{общ}} = d l h_1 * 10^{-6}$, м³

17. Рабочий объем ванны $V_p = d l h_1 * 10^{-6}$ м³

18. Время обработки хромсодержащих стоков

$$\frac{V_p}{u} = t >, \text{ час}$$

ЛИТЕРАТУРА:

- Lee sing Ki blertroehemical contaminant removal from agulous media (Andco Jnc0). Пат. США, кл 204-152 (Co2 с 5/12, B01k 1/00) № 3926754, заявл. 160273, № 332884.
- Hills MR Methodes electrolytiguss pour letraitement des laux usins. Gerres et laux, 1970,vol 23, № 64.
- Отаке Сигэо, 'Дзяпан фудосайэнсу, Jar Food Sci', 1975, 14, № 7, 58-64.
- Dohpalir K. Wyniri Badan had elertor onyulacia zawiesin W. Wodzie daz Woda technika sanitarna, 1971,45,№ 10,342-346.
- Абрамки А.Д.,Об очистке воды при помощи постоянного электрического тока, "Электричество", 1925, № 2.
- Кульский Л.А., Строкач П. П., Слипченко В. А., Сайгак Е.И. Очистка воды электрокоагуляцией. Киев, "Будвельник", 1978.
- Кургаев Е.Ф. Реактор-электрокоагулятор для обработки воды. Авт.свид. СССР, № 192680, 1967, Бюл. № 5.
- Селицкий Г. А., Генкин В. С., Рогозина Н.С. Очистка сточных вод от хрома методом электрокоагуляционного восстановления. Экспресс-информация "Комплексное использование и охрана водных ресурсов, ЦБНТИ, № 8, 1971, серия 4, вып. 8.
- Арчакова Г. А. Сб. "Проблемы использования и охраны водных ресурсов", Минск, "Наука и техника", 1972, 92-97,
- Богоявленский А.Ф., Гаркави М.И., Афанасьев Г.З. Уч. зап. Казанский гос. ун-та им. В. И. Ульянова-Ленина. Химия, 1953, т.113, кв. 8, 23-26.
- Селицкий Г.А. Способ очистки сточных вод электрокоагуляций. Авт. свид. 242764, C02 с 5/12, Б.И. 1969, № 15.
- Селицкий Г.А. Применение метода электрокоагуляционного восстановления для обезвреживания хромсодержащих сточных вод. В сб. Очистка и повторное использование сточных вод на Урале. Свердловск, 1968.
- Генкин В.Е. Очистка промышленных сточных вод методом электрокоагуляции. Сб. Материалы научно-технического семинара на тему: Современные методы очистки промышленных сточных вод". М., 1976.
- Бабенко Е.Д., Грехова М.Х. Закономерности работы электрокоагулятора с биполярными электродами. ЦНИИМПС вып. 468, "Методы очистки и контроль качества воды на железнодорожном транспорте". М., 1972.
- Арчанова Г.А. Применение электрокоагуляции для очистки хромсодержащих стоков В кн. Проблемы использования и охраны водных ресурсов" Минск, 1972, 93-97.
- Временные рекомендации по электрохимической очистке промышленных сточных вод от шестивалентного хрома с использованием стальных электродов. ВОДГЕО, М., 1977.
- Сметанич А.Д., Андрианов В.Ф. Электрохимическая обработка разбавленных хромсодержащих сточных вод. Сб. очистка сточных вод предприятий машиностроительной промышленности. М., 1977, 80-85.
- Гнусин Н.П., Витульская Н.В., Заболоцкая Л.И. Влияние некоторых факторов на процесс электрокоагуляции цинксодержащих растворов. Сб. Рациональное водопользование и современные методы очистки сточных вод гальванических цехов. Киев, 1978, 20-21.
- Мамаков А.Ш., Кушнир А.И, Дрония Р.В., Игнатова Д.Ф. Применение процесса электрокоагуляции в технологии очистки металлосодержащих промышленных стоков. Электронная обработка материалов. 1977, & 4.
- Кобякова Н.И., Генкин В.Е., Жаворонкова В.Н. О возможности электрохимической очистки производственных сточных вод, содержащих одновременно соединения шестивалентного хрома и соли тяжелых металлов. Труды института ВОДГЕО, 1978, вып.71 стр.28.
- Селицкий Г.А., Антропов Н.П. Опыт применения электрокоагуляции для очистки сточных вод от шестивалентного хрома., Сб. Очистка сточных и оборотных вод предприятий цветной металлургии. Каз-механобр, Алма-Ата, 1975, № 15.
- Сучано Идзуру, Хаяси Сабуро " Извлечение тяжелых металлов их сточных вод ферритами", РРМ, 1976, 7, № 2, стр.61-72.
- Сакурэн Хидэ "Электрохимическая очистка сточных вод от тяжелых металлов", РРМ, 1978, 9, № 9, 51-60.
- Канамори Масару, Кидзикава Мики, Такаמידзава Хидэо. "Удаление тяжелых металлов из сточных вод в виде ферритов". Япон.заявка, кл. 13(17), А31, (С01G- 49/00) № 52-124465, заявл. 14.04.76. №51-42113, опубл. 19.10.77.