

## **Природоподобная технология очистки воды: ИЗУМРУД-УНИВЕРСАЛ**

В.М. Бахир, А.Г. Погорелов, В.И. Прилуцкий

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и экспериментальной биофизики Российской академии наук, г. Пущино

### **Аннотация:**

В статье экспериментально обоснованы технологические приемы очистки воды от микроорганизмов и веществ-ксенобиотиков, моделирующие в искусственной электрохимической системе природные процессы очищения воды за счет окислительных и восстановительных реакций, разделенных во времени и пространстве процессами фильтрации. Использование в работе новейших достижений в области конструирования проточных электрохимических реакторов позволило создать универсальную технологию удаления из воды ионов тяжелых металлов, железа, марганца, растворенных органических соединений естественного и искусственного происхождения, микрофлоры и микробных токсинов. Универсальность технологии состоит в возможности ее применения не только для пресной воды, но также для воды с любой степенью минерализации. На основе полученных экспериментальных данных создана компактная высокопроизводительная установка для очистки природной пресной воды.

### **Ключевые слова:**

Электрохимическая активация, вода, растворы, анолит, католит, метастабильность, электрохимический реактор, хлор, озон, кислород, пероксид водорода, хлорноватистая кислота, фагоциты, гидроксиды, коагуляция, ИЗУМРУД, АКВАТРОН, диафрагма, электроды, окислительно-восстановительный потенциал, активность ионов, концентрация ионов, окисление, восстановление, фильтрация, железо, марганец, биопленки, микроорганизмы, резистентность, гипохлорит, хлорамин.

### **Феноменологический анализ проблемы.**

Природная пресная вода прежде, чем стать питьевой, должна быть освобождена от микроорганизмов и веществ-ксенобиотиков, а также от избыточного количества растворенных или взвешенных химических соединений, ухудшающих ее биологические, органолептические или физико-химические свойства. Технологиям очистки и кондиционирования воды посвящено огромное количество научных публикаций, но проблема продолжает оставаться актуальной. Более того, проблема усложняется, что вполне объяснимо с позиций Единой теории всех взаимодействий в веществе, созданной физиком-теоретиком И.Л. Герловиным [1]. В соответствии с названной теорией скорость эволюционного развития Вселенной намного выше скорости познания человеком окружающего мира. Поэтому человек всегда будет отставать в оценке и реагировании на любые изменения мира вообще и мира воды в частности. В книге И.Л. Герловина в качестве эпиграфа к одной из глав приведены замечательные слова Эйнштейна, идеально характеризующие нынешнюю ситуацию в водоподготовке: «Кто бы мог подумать, что мы будем так много знать и так мало понимать». Практика очистки воды при помощи ввода равного или большего количества химических реагентов в сравнении с количеством загрязняющих ее субстанций является заведомо нерациональной, поскольку оказывает негативное влияние на окружающую среду и не позволяет обеспечить эффективную

очистку и кондиционирование воды. Первое утверждение объясняется просто: для того, чтобы ввести в воду химические реагенты, их нужно произвести, затратив природные ресурсы минерального или растительного сырья, энергию, труд, время. Добавка химических реагентов в воду с целью подготовки к подаче в сеть питьевого водоснабжения неизбежно приводит к обогащению воды другими, часто не менее вредными по последствиям, веществами. Например, ввод обеззараживающего раствора гипохлорита натрия в воду на муниципальных станциях водоочистки неизбежно сопровождается вводом балластных веществ в виде щелочи и соли, что увеличивает скорость коррозии и осадконакопления. Недостаточная антимикробная активность гипохлорита, не позволяющая обеспечить наличие активного хлора в отдаленных участках водоразводящей сети, заставляет проводить аммонизацию воды посредством ввода аммиака или серноокислого аммония, что приводит к образованию малоактивного антимикробного средства – хлорамина в форме неорганического или органического соединения с хлором. Хлорамин позволяет продлить существование соединений активного хлора, но по сути является ксенобиотиком, то есть, веществом, чуждым жизни, от греческого: ξένος — чуждый и βίος — жизнь. Общей закономерностью действия ксенобиотиков являются повышение частоты аллергических реакций, гибель организмов, изменение наследственных признаков, снижение иммунитета, нарушение обмена веществ, нарушение хода процессов в естественных экосистемах вплоть до масштабов биосферы в целом.

Второе утверждение основано на открытом в 1867 году норвежскими учеными К. Гульдбергом (Cato Maximilian Guldberg) и П. Вааге (Peter Waage) химическом законе действующих масс. Одно из следствий этого закона гласит, что чем меньше концентрация взаимодействующих веществ в растворе, тем медленнее протекает реакция взаимодействия между ними. Применительно к рассматриваемой ситуации данное следствие звучит следующим образом: чем меньше концентрация веществ в воде, тем больше времени требуется для осуществления химических реакций их нейтрализации эквивалентным количеством химических реагентов. Часто это время оказывается намного больше времени очистки и кондиционирования воды на существующих водоочистных сооружениях. В этом одна из причин появления в питьевой воде новых типов загрязнителей типа антибиотиков, гормональных препаратов (использующихся людьми для собственных нужд, для выращивания птицы, рыбы, сельскохозяйственных животных), антидепрессантов, контрацептивов и многих других фармацевтических препаратов.

Главный недостаток традиционной системы обеззараживания воды химическими реагентами типа гипохлорита и хлорамина состоит в адаптации микроорганизмов к малоактивным окисляющим и обеззараживающим агентам.

Открывая кран у себя в городской квартире, люди иногда замечают мелькнувшую в струе воды маленькую темную полоску - змейку, которая представляет собой оторвавшуюся с внутренней стенки водопроводной трубы биопленку. Биопленкой обычно покрыта вся внутренняя поверхность водопроводной сети, особенно если обеззараживание производится гипохлоритом натрия в комплексе с аммонизацией. Микроорганизмы, обитающие в биопленке, питаются помимо прочего органической частью молекул хлорамина. По окончании биологического цикла развития биопленка отрывается от стенки трубы на отдельных участках, которые уже к этому времени покрыты молодыми биопленками. Микроорганизмы непрерывно строят и совершенствуют свою защитную структуру - биопленку, обеспечивающую им комфортную среду обитания.

Известна простая истина: живое всегда побеждает мертвое. Живые, совершенствующиеся, адаптирующиеся к изменяющимся условиям среды обитания микробы всегда найдут способ защититься от неприятного для них вещества со стабильным химическим составом. Но не смогут найти способ защиты от метастабильной, разнообразной в проявлениях реакционной активности смеси взаимодействующих соединений, которая опережает их на порядки по изменчивости. Микроорганизмы давно научились питаться неэффективными или потерявшими активность дезинфицирующими

средствами, успешно живут при постоянной температуре 400 °С (хемотробы черных курильщиков), но за миллионы лет не смогли приспособиться к воздействию прямого солнечного света, пламени возгорания древесины (300 °С) или контакту со смесью оксидантов (хлорноватистой кислоты и пероксида водорода), вырабатываемой фагоцитами в живом организме. Уже вторую сотню лет они не могут адаптироваться к рентгеновскому и гамма излучению, необжигающему пламени диэтилового эфира борной кислоты (40 °С), тлеющему электрическому разряду, хотя буквально в считанные недели вырабатывают резистентность к новым дезинфекционным средствам, щедрым потоком льющим в медицину и пищевую промышленность. Дело в том, что активность ионов в метастабильных химических композициях, образующихся при разного рода неравновесных воздействиях, выше, чем активность жизнеобеспечивающих ионов в живых микроорганизмах. Именно поэтому комплексное воздействие неприятных для микроорганизмов компонентов окружающей среды, имеющих избыточную химическую активность, вызывает их повреждение и гибель. Понятие активности ионов было введено американским ученым Г. Льюисом (Gilbert Newton Lewis) в 1907 году. Он назвал активностью кажущуюся концентрацию вещества, использование которой в уравнении закона действующих масс делает его справедливым для любых растворов при любых концентрациях. Коэффициент активности, связывающий реальную (весовую) и кажущуюся (эффективную, химически реализующуюся в реакциях) концентрации растворенного вещества учитывает отклонения реального раствора от идеального, которые обусловлены электрическими взаимодействиями между ионами в растворе.

Коэффициент активности ионов в разбавленных растворах, к которым можно отнести питьевую воду, близок к единице, то есть, активность практически соответствует концентрации. Это утверждение не распространяется на живые системы, представленные микроорганизмами. Жизнь всегда связана с избыточной электрической активностью структур, ее представляющих. Находясь в тесном взаимодействии с источниками электрических полей в микроорганизмах, ионы приобретают повышенную активность, не соответствующую концентрации. Избыточная энергия, как правило, проявляется в самоорганизации структурных элементов, заключающих в себе эту энергию. Именно избытком внутренней потенциальной энергии живых систем определяется их способность трансформации и адаптации к условиям окружающей среды, в конечном счете, - к развитию и совершенствованию. Моделью самоорганизующихся неживых структур, обладающих избыточной энергией, являются ячейки Бенара - возникновение упорядоченности в виде конвективных ячеек в форме цилиндрических валов или правильных шестигранных структур в слое вязкой жидкости (масла) с вертикальным градиентом температуры, то есть равномерно подогреваемой снизу.

В живых системах активность ионов не соответствует их концентрации, поскольку процессы жизнеобеспечения, которые протекают с участием воды, активируют ионы. Поэтому природная пресная вода по некоторым свойствам близка к живым системам. Этот факт отмечали не только ученые, но и просто наблюдательные и думающие люди: Леонардо да Винчи («Вода была дана волшебная власть стать соком жизни на Земле»), Альберт Сент-Дьердьи («Жизнь зародилась в воде, развивалась в воде, вода является ее растворителем и средой. Она является матрицей жизни»), Антуан де Сент Экзюпери («Вода, у тебя нет ни вкуса, ни цвета, ни запаха, тебя невозможно описать, тобой наслаждаются, не ведая, что ты такое. Нельзя сказать, что ты необходима для жизни: ты - сама жизнь. Ты наполняешь нас радостью, которую не объяснить нашими чувствами»).

### **Исследование процесса электрохимического регулирования окислительно-восстановительных и кислотно-основных свойств пресной воды.**

Результаты исследования процесса изменения активности бидистиллированной воды с весьма низким содержанием ионов электролитов примесей под действием

электрического поля [2] показали возможность достижения активностью электронов, измеряемой посредством платинового электрода относительно хлорсеребряного электрода сравнения, значений электродвижущей силы, несколько упрощенно называемой окислительно-восстановительным потенциалом (ОВП), превосходящих пределы термодинамической устойчивости воды. Эти отклонения гарантированно вызывают гибель всех известных форм жизни из-за невозможности живых структур компенсировать влияние активированной среды. Продолжение этих исследований выполнено в 2018 году на установке АКВАТРОН-15-50Л, оснащенной реактором РПЭ-14 из проточных модульных электрохимических элементов МБ-11Т-01 [3], каждый из которых фактически является независимым компактным диафрагменным электрохимическим реактором. Целью исследований являлось изучение диапазона значений активности электронов при электрохимической обработке пресной питьевой воды с общей минерализацией менее 0,3 г/л. Наряду с биологическими экспериментами, основанными на применении электрохимически активированных субстанций и предусмотренными программой работ по гранту РФФИ, выполнены исследования процесса синтеза анолита и католита обычной водопроводной питьевой воды в различных режимах потока через узкие кольцевые протяженные зазоры между электродом (анодом, катодом) и керамической ультрафильтрационной диафрагмой из оксида алюминия в альфа-форме. Электрохимически активированная вода и растворы весьма активно изучаются представителями научного сообщества во всем мире. За период с 1995 по 2015 годы опубликовано более 300 000 научных работ в этой области. Исследователи уделяют внимание процессам использования электрохимически активированных растворов в различных технологических процессах, но исчезающе малое количество работ посвящено изучению собственно электрохимических систем для синтеза электрохимически активированных воды и растворов. Авторам статьи неоднократно приходилось видеть в лабораториях солидных университетов, сотрудники которых опубликовали интереснейшие статьи о результатах применения электрохимически активированной воды в различных процессах, примитивные устройства, в которых исследователи получали главный компонент своего исследования – электрохимически активированный раствор или воду. Практически все электрохимические устройства – промышленные, лабораторные, бытовые, изготовленные неавторизованными производителями, позволяют получить только малые или следовые количественные и качественные эффекты, обусловленные метастабильным состоянием приэлектродной среды. Учитывая несовершенство аппаратуры, на которой проведено большинство исследований, можно с уверенностью утверждать, что перспективы применения технологии электрохимической активации намного шире, чем описаны в научных работах.

Поскольку российская группа ученых и специалистов является лидирующей в мире в области конструирования технических систем для синтеза электрохимически активированных воды и растворов, то в данных исследованиях нами дополнительно сделан акцент на изучение однородности физико-химических свойств различных керамических ультрафильтрационных диафрагм из оксида алюминия в альфа-форме. Новые диафрагмы изготовлены по технологии экструзионного прессования в отличие от способа шликерного литья, которым изготавливались многие годы диафрагмы из оксида циркония. Именно такие диафрагмы использовались во многих сотнях тысячах произведенных с 1990 по 2015 годы электрохимических элементах ПЭМ и МБ. Разброс физико-химических параметров оксидно-циркониевых диафрагм требовал индивидуального подбора для комплектования реакторов, состоящих из большого количества элементов ПЭМ или МБ.

Исследования параметров воды, подвергнутой катодному или анодному электрохимическому воздействию, проводились ранее преимущественно на одиночных электрохимических реакторах или реакторах, собранных из индивидуально подобранных нескольких элементов ПЭМ и МБ [4-10]. В результате было установлено, что рН и ОВП анолита и католита пресной воды приобретают аномальные значения в сравнении со значениями, которые рассчитаны на основе законов равновесной термодинамики, а также

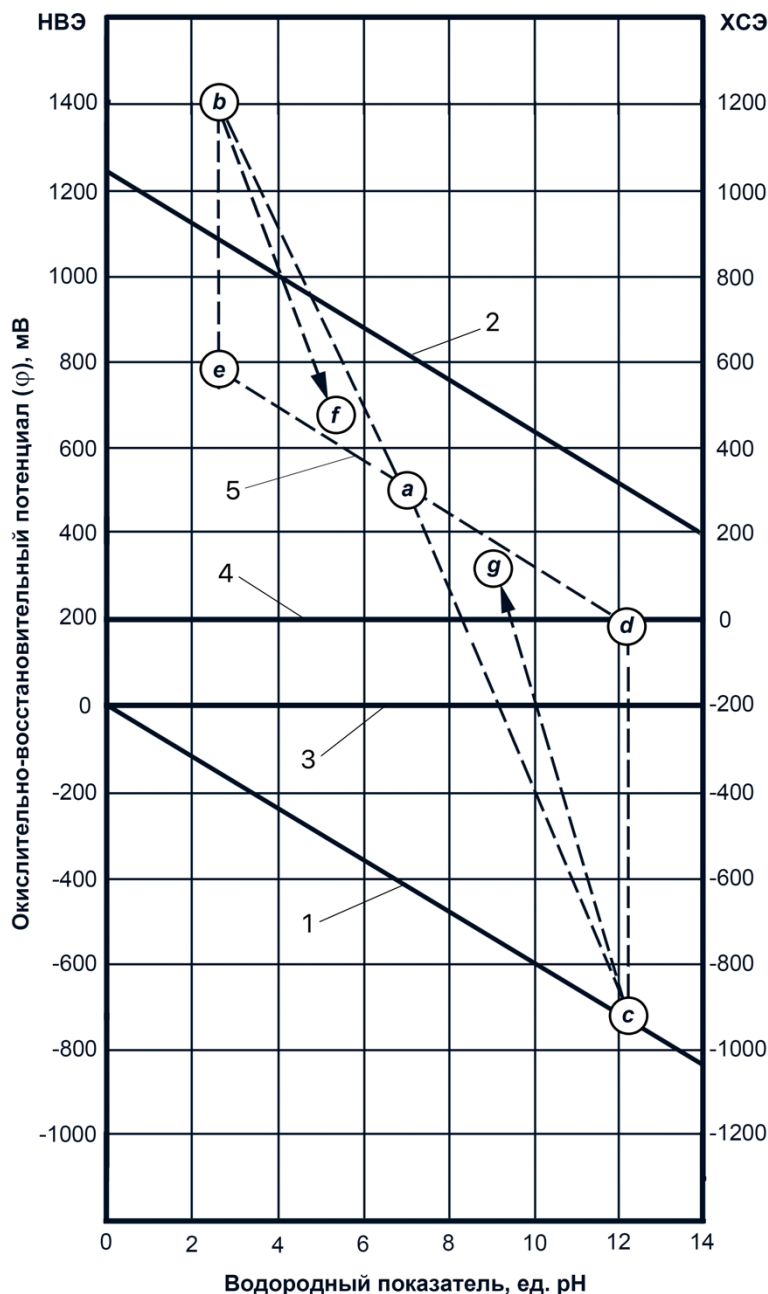


Рис. 1. Соотношение pH и ОВП при электрохимическом и химическом регулировании параметров пресной воды. Условные обозначения: 1 и 2 – потенциалы восстановления воды на инертном катоде ( $\varphi_1 = -0,0592$  pH) и окисления на инертном аноде ( $\varphi_2 = 1,23 - 0,0592$  pH) соответственно; 3 и 4 – нулевые линии шкал водородного (НВЭ) и хлорсеребряного (ХСЭ) электродов сравнения; 5 – направление изменения pH и ОВП при химическом регулировании параметров воды; a – исходные значения параметров пресной воды: pH = 7,0; ОВП = + 320 мВ (ХСЭ); b и c – параметры анолита и католита соответственно: pH = 2,7; ОВП = + 1200 мВ (ХСЭ), pH = 12,3; ОВП = - 920 мВ (ХСЭ); d и e – параметры химических моделей католита и анолита соответственно: pH = 12,3; ОВП = 0 мВ (ХСЭ), pH = 2,7; ОВП = + 780 мВ (ХСЭ); f и g – параметры анолита и католита после окончания релаксации соответственно: pH = 5,7; ОВП = + 400 мВ (ХСЭ), pH = 9,0; ОВП = + 120 мВ (ХСЭ).

значениями, полученными моделированием кислотно-щелочных свойств анолита и католита путем ввода в исходную воду кислоты и щелочи.

Дополнительная исследовательская задача решалась через основную посредством изменения конструкции реактора, собранного из четырнадцати параллельно гидравлически включенных электрохимических элементов без индивидуального подбора по характеристикам диафрагмы.

Результатом исследований явилось полученное при меньшем расходе электроэнергии экспериментальное подтверждение ранее полученных данных по изменению pH и окислительно-восстановительного потенциала пресной воды, подвергнутой электрохимическому воздействию у поверхности положительного и отрицательного электродов электрохимической системы. Новизна полученных в 2018 году результатов состоит в том, что за счет работы реакторов электрохимической системы в режиме самоорганизующихся структур энергомассопереноса потребовалось приблизительно в 2,5 раза меньше затрат электроэнергии для достижения предельных параметров отклонения pH и ОВП от состояния равновесия. На рис. 1 приведены результаты экспериментов по исследованию параметров электрохимически активированной пресной воды, полученной при помощи установки АКВАТРОН-15-50Л. В качестве исходной во всех опытах использовалась водопроводная питьевая вода

северо-западного района г. Москвы со следующими параметрами: общая минерализация – 0,21 г/л; жесткость – 3,6 мг-экв/л; рН – 7,1 ÷ 7,2; окислительно-восстановительный потенциал, измеренный с помощью платинового электрода относительно хлорсеребряного электрода сравнения, - от +250 до + 290 мВ; удельная электропроводность – в среднем 0,00031 См/см.

Измерение рН и ОВП производили рН-метром PH FE20 (METTLER-TOLEDO), удельной электропроводности воды – кондуктометром FP-30 – STANDARD (METTLER-TOLEDO).

В установке АКВАТРОН-15-50Л, в отличие от известных электрохимических систем для получения анолита и католита пресной воды [11], использовался реактор из четырнадцати проточных электрохимических модульных элементов МБ-11Т-01 (рис. 2), ультрафильтрационные диафрагмы которых выполнены из химически чистого оксида алюминия в альфа-форме. Однородность структуры и физико-химических свойств диафрагм позволили обеспечить практически полное разделение ионов на катионы и анионы с образованием соответствующих электрохимически активированных продуктов анодных и катодных реакций.

Охлаждаемые электроды элементов МБ-11Т-01 обеспечивали постоянство температуры воды, протекающей через электродные камеры в пределах 22 плюс-минус 1 °С. Сила тока поддерживалась в пределах от 9,1 – 9,2 А при напряжении 10 – 12 вольт. Удельное количество электричества, затраченное на электрообработку воды в катодной или анодной камерах элемента МБ, составляло от 300 до 400 Кл/л.

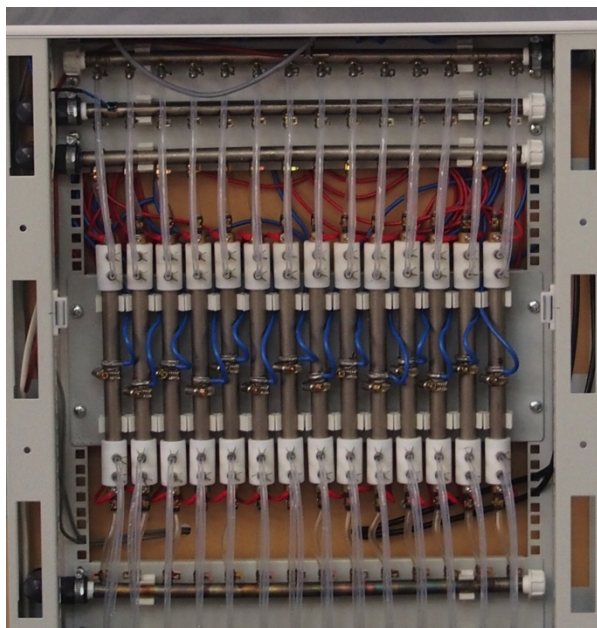


Рис. 2 Электрохимический реактор РПЭ-14 установки АКВАТРОН-15-50Л

Измерения рН, ОВП и электропроводности производились в течение 2 – 3 минут после прекращения процесса электрохимической обработки. Время каждого измерения не превышало 5 минут.

Результаты исследований отражены на рис. 1, где в координатах рН – ОВП показаны как исходные значения этих параметров, так и полученные в результате катодной и анодной обработок. Также показаны параметры анолита и католита после окончания периода релаксации (около 72 часов в закрытых сосудах). Буквами «e» и «d» отмечены области химического моделирования рН свежеполученных католита и анолита соответственно.

Моделирование католита производилось вводом микродобавок гидроксида натрия в исходную воду. Для моделирования анолита использовали микродобавки соляной кислоты. Замена соляной кислоты на серную не приводила к существенным отклонениям.

В сравнении с данными исследований на бидистиллированной воде [2], увеличение концентрации ионов электролитов в исходной пресной воде от нескольких десятков до нескольких сотен миллиграммов в литре во много раз усиливает “активационную” составляющую реакционной способности анолита и католита за счет вариации коэффициента активности в пределах, близких к единице, и, соответственно, повышает роль и технологическое значение активированной воды.

Анализ результатов практического эксперимента подтвердил, что электрохимическое неравновесное воздействие способно в десятки раз изменять реакционную способность (активность) ионов в растворах без изменения их концентрации.

Достигнутые в процессе электрохимического воздействия значения pH соответствуют равновесным концентрациям щелочи и кислоты, во много раз превышающими содержание солей в воде, из которых данные щелочи и кислоты могли быть получены. Значения же ОВП выходят за пределы возможностей химического моделирования при данной электропроводимости и поэтому являются уникальными.

Выводы:

1. Электрохимическое безреагентное регулирование свойств и параметров воды позволяет обеспечить окисление или восстановление практически любых веществ, содержащихся в воде.
2. Наиболее экономичный способ электрохимического регулирования свойств и параметров пресной воды состоит в использовании проточных электрохимических модульных элементов МБ с диафрагмами на основе оксида алюминия в альфа-форме.

### **Электричество и вода: поиски наилучшего сочетания.**

Пресная вода - плохой проводник электричества, что обусловлено низкой концентрацией заряженных частиц – ионов, образующихся при растворении различных солей, представляющих минеральный состав воды. На рис. 3 показана обобщенная зависимость электропроводности воды в зависимости от концентрации растворенных электролитов, в том числе не только различных солей, но также соответствующих кислот и оснований. Пресная питьевая вода в большинстве случаев имеет удельную электропроводимость в диапазоне 0,0001 – 0,001 См/см, то есть примерно в тысячу раз меньшую, чем растворы электролитов в традиционном электрохимическом производстве. Именно поэтому до конца восьмидесятых годов принято было считать, что электролиз пресной, а тем более дистиллированной воды, невозможен.

Другой фактор, препятствующий развитию электрохимических технологий для пресных и солоноватых вод – сложность аппаратного оформления процесса. Во время работы любой электрохимической системы на разбавленном растворе смеси различных электролитов со спонтанно изменяющимся химическим составом происходят постоянные и часто непредсказуемые изменения условий электрохимического воздействия, связанные с образованием осадков, выделением агрессивных газов, повреждающих элементы конструкции, химически активных продуктов электролиза, реагирующих с исходными веществами с образованием твердых частиц и неэлектропроводных пленок. Весьма часто наблюдается блокирование электродов и диафрагмы труднорастворяющимися неорганическими и органическими продуктами физико-химических реакций в электродных камерах. Традиционно эти сложности исключают либо путем использования исходных растворов со строго определенным химическим составом, свободным от мешающих примесей (производство водорода, кислорода, хлора и щелочей, гальваническое производство), либо путем создания грубых, массивных и неприхотливых в обслуживании конструкций (рафинирование цветных и благородных металлов, получение цветных металлов из руд). И в том и другом вариантах используется вода, но либо в виде предельно очищенного концентрированного раствора электролитов строго постоянного состава, либо неочищенного, но также концентрированного раствора электролитов.

Очевидно, самым первым творцом электрохимической очистки воды различной степени минерализации – от пресной дождевой до соленой морской и океанской, является Природа.

Механизм процессов очистки воды в Природе представлен двумя основными процессами: окислительно-восстановительными реакциями и фильтрацией. Другие процессы – сорбция, ионный обмен, коагуляция, флокуляция, коалесценция, седиментация являются дополнительными и обычно протекают во время фильтрации очищаемой воды сквозь почвенные слои, массивы осадочных и горных пород.

В Природе процессы окисления и восстановления растворенных в воде веществ протекают раздельно во времени и пространстве. К примеру, окисление растворенных

химических соединений кислородом воздуха происходит при образовании ряби на воде или волн с барашками пены от порывов ветра, восстановление – при соприкосновении воды с окисляющимися природными минералами или почвенными субстратами в процессе фильтрации.

Процессы приема и передачи электронов в Природе протекают медленно, в

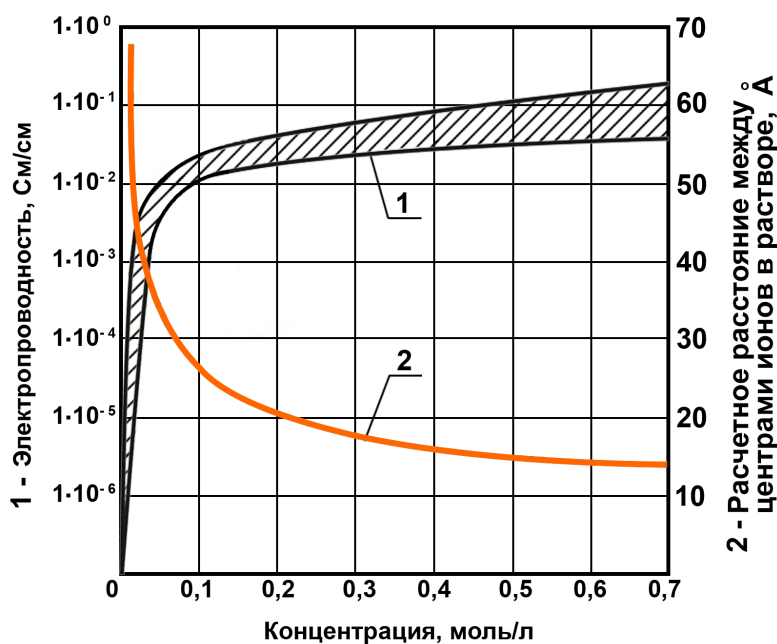


Рис. 3. Зависимость электропроводности водных растворов неорганических электролитов (кислот, оснований, солей) от концентрации

условиях, не очень отдаленных от состояния термодинамического равновесия, в соответствии с законом действующих масс. Преимущественно область очистки пресной и слабосоленовой воды в природной среде располагается в диапазоне концентраций 0,0015 – 0,03 моль/л. Расстояния между ионами солей в воде очень велики, образно говоря, ионы практически «не видят» друг друга (кривая 2 на рис. 3). Ускорить искусственно процессы окисления или восстановления принципиально возможно в диафрагменных электролизерах, где анодное и катодное пространства разделены пористой перегородкой, препятствующей перемешиванию жидкостей, которые, вне зависимости от химического состава, называются католитом или анолитом, если подверглись или подвергаются действию электрического тока в катодной или анодной, соответственно, камерах диафрагменного электролизера. Но нужно иметь в виду, что ионы в воде даже под действием электрического поля перемещаются весьма медленно, всего несколько миллиметров в час. В любой перегородке, через которую ионы движутся под действием только электромиграционного массопереноса, их скорость уменьшается. Особенно большая задержка скорости переноса ионов характерна для полимерных ионселективных мембран, где скорость перемещения ионов снижается в тысячи раз в сравнении со скоростью их перемещения в свободном растворе. Также играет большую роль характер потока жидкости в электродных камерах электролизера (электрохимического реактора). Условно, активным реагентом в электрохимических реакциях выступает поверхность электрода. Поэтому задача повышения эффективности процессов взаимодействия с этим реагентом в условиях, продиктованных законом действия масс, состоит не в увеличении концентрации действующих реагентов, как это делают обычно в химических и традиционных электрохимических технологиях, а в обеспечении соприкосновения взаимодействующих веществ. Иными словами, следует добиваться соприкосновения каждого микрообъема жидкости, протекающей через электродную камеру, с поверхностью соответствующего электрода, где в диффузной части двойного электрического слоя (ДЭС) напряженность электрического поля составляет от нескольких тысяч до нескольких сотен тысяч вольт на сантиметр и где подвижность ионов практически не зависит от вязкости окружающей их среды, но только от напряженности электрического поля. Задача весьма непростая, и для осуществления процессов электрохимической активации необходимы специальные электрохимические реакторы, поскольку традиционные электролизеры, как лабораторные, так и промышленные, сконструированные для оптимальной реализации традиционных технологических процессов прикладной электрохимии, не пригодны для работы на



пресной воде или разбавленных водных растворах. ДЭС имеет очень малую толщину: в разбавленных растворах и пресной воде - порядка 0,1 микрона, в концентрированных - намного меньше. Чтобы яснее представить себе, насколько сложно обеспечить соприкосновение всех микрообъемов воды, окружающей электрод, с его поверхностью, допустим, что в стакан погружен электрод в виде металлического прутка диаметром с карандаш. Если допустить также, что область высокой напряженности электрического поля вокруг электрода (область ДЭС) вдруг увеличилась и достигла 1 мм, то, для сохранения пропорций системы, диаметр стакана должен возрасти от 7 сантиметров до 700 метров. Понятно, что обеспечить обработку всей воды этого «озера» у поверхности электрода - карандаша невозможно, не прибегая к специальным приемам.

С появлением в 1989 году проточных электрохимических модульных элементов ПЭМ [12-19] стало возможным осуществлять в проточном режиме, при малых затратах электроэнергии процессы очистки воды прямым только окислительным в анодной камере или только восстановительным в катодной камере процессами, разделенными во времени и пространстве. Минимальный расход электроэнергии обеспечила тысячекратно возросшая скорость переноса ионов через керамическую диафрагму элементов ПЭМ. Увеличение скорости переноса ионов через керамическую пористую диафрагму элементов ПЭМ обусловила искусственно вызванная ионселективность диафрагмы за счет перепада давления между анодной и катодной камерами и формирования фильтрационного потока, насыщенного ионами одного знака благодаря сепарации в электрическом поле. Данный процесс впоследствии был назван ионселективным электролизом с диафрагмой [10].

Появление установок ИЗУМРУД в 1991 году фактически открыло новое направление в технологии очистки воды, поскольку позволило реализовывать сложные процессы очистки, состоящие, как правило, из стадий окисления в анодной камере, стадий восстановления в катодной камере, с промежуточными стадиями, реализующими результаты физико-химических процессов после активных (электрохимических) стадий воздействия. Такими стадиями были флотация, сорбция, индуцированный аномальными значениями ОВП электрокатализ, окислительное удаление хлоркислородных оксидантов на углеродных гранулах.

Всего в период с 1991 по 2016 годы было изготовлено и продано потребителям более 300 000 оригинальных установок ИЗУМРУД для доочистки питьевой воды.

Большая часть всех установок ИЗУМРУД была произведена с использованием элементов ПЭМ-3 и МБ-11 [11], снабженных оксидно-циркониевыми диафрагмами диаметром 11 мм. Производительность таких установок была в пределах от 40 до 60 литров в час. При уменьшении скорости протока степень преобразования трудноокисляемых элементов в воде, таких, как органическое железо, органический марганец, увеличивалась при снижении скорости протока только в том случае, если скорость протока была менее 10 литров в час и при вдвое большей силе тока. При увеличении скорости протока эффективность удаления органического железа уменьшалась. Эти результаты были многие годы приняты как характеристики установок ИЗУМРУД, поскольку основным способом удаления скоагулировавшихся или превратившихся в нерастворимые частицы веществ была флотация в напорном флотационном реакторе. Флотационное удаление примесей позволяло при малых габаритах установки обеспечить удаление более шестидесяти процентов веществ, претерпевших изменения агрегатного состояния в электродных камерах элементов ПЭМ или МБ. Загрязнения не накапливались в системе очистки, и это позволяло избавить потребителя от необходимости периодической замены каких-либо элементов устройства. Периодические и все более часто повторяющиеся запросы потребителей о необходимости установки ИЗУМРУД большой производительности стимулировали исследовательскую работу в этом направлении, выполненную совместно с учеными Института Теоретической и Экспериментальной Биофизики Российской Академии Наук. Оказалось, что исходя из результатов экспериментальных биофизических исследований, стремление внушать человеку пользу постоянного потребления воды с определенным значением

окислительно-восстановительного потенциала является неверным. Вода с высокими значениями окислительного или восстановительного потенциала, произведенная в сертифицированных электрохимических устройствах, может использоваться только в лечебных целях и только по назначению врача. Вода, произведенная в существующих установках ИЗУМУРУД, не подлежит хранению ввиду отсутствия защищающих ее от микрофлоры агентов. В условиях длительного сохранения воды с отрицательным значением ОВП в закрытых системах (емкостях, трубопроводах без протока) происходит ее заражение сульфатредуцирующими бактериями, которые получают энергию за счет окисления водорода, растворенного в катодно-обработанной воде.

**Выводы:**

1. Флотация в установках ИЗУМУРУД не позволяет удалять коллоидно-дисперсные частицы.
2. Установки ИЗУМУРУД следует снабжать фильтрующими элементами для удаления всех коллоидно-дисперсных частиц, образовавшихся в результате окислительного или восстановительного электрохимического воздействия, что позволит также уменьшить потери воды за счет исключения дренажных сбросов из флотационных реакторов.

### **Исследования новой технологии очистки воды: окисление, восстановление, фильтрация.**

Создание в 2016 году нового поколения электрохимических реакторов МБ-11Т и МБ-26Т (рис. 4) с керамическими ультрафильтрационными диафрагмами из оксида алюминия в альфа-форме и размерами пор от 0,01 до 01 мкм позволили интенсифицировать процессы электрохимического воздействия на разбавленные растворы электролитов за счет стабильных физико-химических и физико-механических свойств диафрагм и устойчивой возможности создавать самоорганизующиеся вихревые структуры потока в работающем электрохимическом реакторе при высоких скоростях движения жидкости.

Практический выход новые конструктивные и технологические решения нашли в создании установок ИЗУМУРУД - УНИВЕРСАЛ большой производительности.

На основе изложенных выше результатов исследований проектирование установок для очистки воды с элементами типа МБ-26 с диафрагмой диаметром 29 мм проводилось исходя из закона подобия: если сила тока через элемент МБ-11 составляет 1 ампер, а скорость протока 50 литров в час, то при силе тока через элемент МБ-26, равной 5 ампер, скорость протока должна быть 250 литров в час. Но при таких параметрах степень очистки воды в элементах МБ-26 была намного хуже, чем в элементах МБ-11.

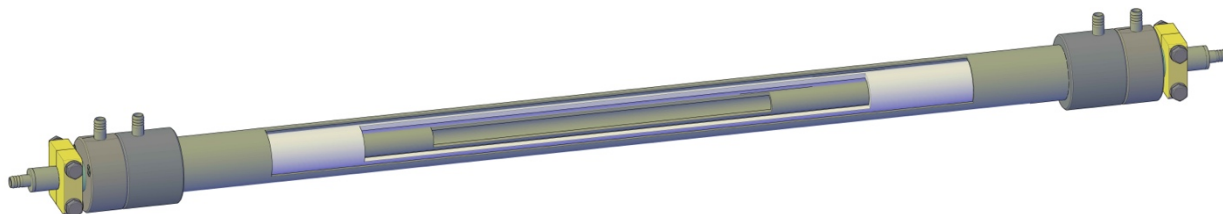


Рис. 4. Проточный электрохимический модульный элемент МБ модели 2016 года. Протяженные кольцевые зазоры между коаксиально размещенными электродами и разделяющей их керамической ультрафильтрационной диафрагмой из оксида алюминия в альфа-форме, обеспечивают элементу МБ одновременно свойства реактора идеального смешения и реактора идеального вытеснения.

Выполнению подобных практических оценок эффективности очистки воды способствовал экспресс-метод оценки качества обработки воды посредством наблюдения за скоростью изменения цвета фильтра, через который с постоянным расходом протекает прошедшая одну из стадий электрохимической обработки вода, исходно содержащая ионы железа и/или марганца. Чем быстрее меняется окраска фильтра, тем лучше очистка при прочих равных условиях, то есть, тем эффективнее электрохимические преобразования в жидкости. Обычно время изменения цвета фильтра происходит в

течение 30 – 40 минут даже при работе на обычной водопроводной воде. Контрольные измерения эффективности очистки воды от железа проводились колориметрическим методом с сульфосалициловой кислотой по ГОСТ 4011-72. Ранее было установлено, что при обработке пресной воды в анодной камере элемента МБ количеством электричества 30-40 Кл/л гарантированно уничтожаются все микроорганизмы, в том числе, в виде биопленки и разрушаются микробные токсины. Поэтому исследования эффективности извлечения железа и марганца из воды производили при заведомо больших значениях затрачиваемого удельного количества электричества на обработку воды.

Принципиальная схема проточной электрохимической системы, изображенная на рис. 5, позволила учесть следующие важные моменты технологии очистки. Вначале

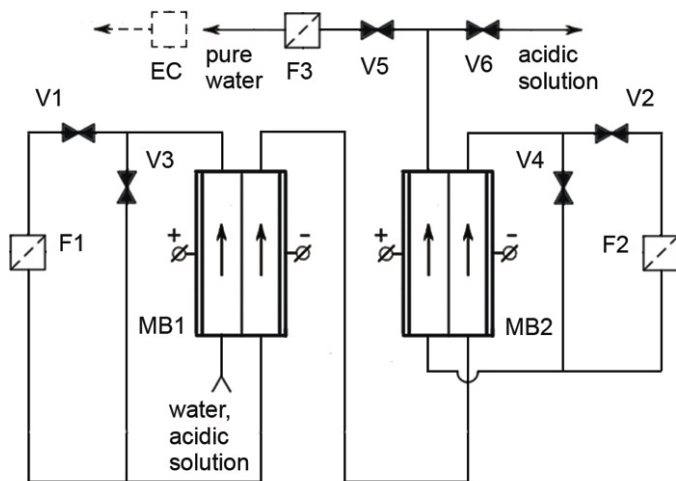


Рис. 5. Принципиальная гидравлическая схема процесса очистки воды в установке ИЗУМРУД-УНИВЕРСАЛ

процесса очистки необходимо уничтожить всю микрофлору для того, чтобы в дальнейшем все фильтрующие элементы работали «в чистоте», то есть, были бы полностью свободны от биопленок, которые являются привычным явлением практически во всех фильтрующих системах, где не производится предварительное обеззараживание воды с вводом защищающих воду от микрофлоры веществ. Затем, после отделения скогулировавших частиц на фильтре следует обеспечить удаление ионов металлов с низким рН гидратообразования. В эту

категорию входят практически все тяжелые металлы, железо, медь, цинк, магний и некоторые другие. Затем, после удаления гидроксидов на фильтре, необходимо вновь защитить воду путем синтеза в ней оксидантов. Все электрохимические преобразования – катодные и анодные – должны быть симметричными по удельному количеству электричества для сохранения рН очищенной воды на прежнем уровне.

Исследования показали, что при относительно небольшом изменении потребляемой электрической мощности, эффективность очистки имеет максимумы и минимумы, в зависимости от скорости потока, температуры воды и концентрации железа. Поскольку удельный расход энергии до, во время и после экстремума кривой эффективности очистки изменяется пропорционально расходу воды, то обнаруженный эффект был связан с образованием резонансной самоорганизующейся структуры потока в электродных камерах под действием суперпозиции различных полей: электростатических сил между электродом и поверхностью диафрагмы, векторного поля скоростей потока, напряженности электрического поля между электродами, поля объемной плотности тока, поля электрофоретического перемещения высокозаряженных продуктов электрохимических реакций. Иначе говоря, было обнаружено, что в элементах МБ-26Т с диафрагмой большего диаметра (29 мм) действует тот же закон минимумов и максимумов электрической проводимости, что и в элементах МБ-11Т, с диафрагмой меньшего диаметра (12 мм). Один из максимумов для элементов МБ-26Т лежит в интервале 300 – 500 литров в час. Некоторое изменение конструкции впускных и выпускных камер элемента МБ-26Т позволило обеспечить проток 500 литров в час через элемент МБ-26Т при силе тока 5 ампер и часовом удалении 2100 мг железа из протекающей воды. Ранее при той же силе тока и скорости потока 250 л/ч удавалось извлекать только 1300 мг железа в час. Это значит, что в соответствии с законом действующих масс резко

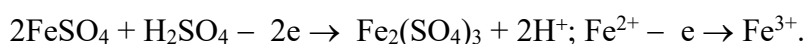
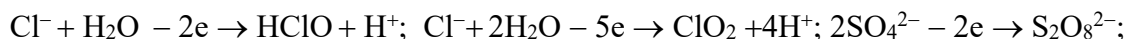
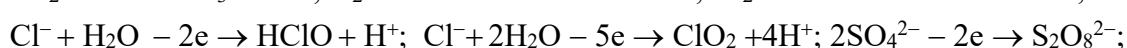
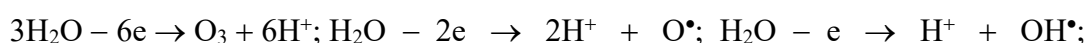
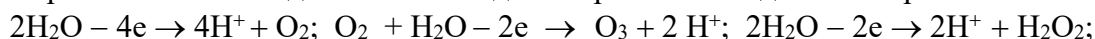
усилилась вероятность взаимного контакта реагирующих частиц в потоке воды между собой и с поверхностью электрода. Потому возросли скорости реакций взаимодействия без изменения концентрации взаимодействующих веществ. Закон действующих масс в большинстве традиционных технологий очистки воды используется только по одной компоненте регулирования скорости реакций взаимодействия - концентрации взаимодействующих веществ, что обусловлено конструкцией применяемого оборудования. Однако, в данном случае, в элементах МБ, работающих в режиме самоорганизующихся микроструктур потока, главную роль играет другая составляющая, также управляющая скоростью реакции – частота контактов взаимодействующих частиц при данной концентрации. Элементы МБ в отличие от всех известных в мире электролизеров, являются электрохимическими реакторами идеального смешения и одновременно реакторами идеального вытеснения. Все остальные известные электрохимические системы не соответствуют этим критериям.

Обнаруженный эффект подтвердил правильность выбора новой концепции установок ИЗУМРУД, которая обогатилась требованием обязательного тщательного удаления коллоидно-дисперсных продуктов анодного окисления и катодного восстановления из воды посредством фильтрации перед началом очередной активной (электрохимической) стадии обработки воды, а также после окончания последней активной стадии подготовки воды. Процессы удаления коллоидно-дисперсной фазы из воды могут быть различными по природе. Фильтрация является наиболее простым и доступным приемом. В соответствии с новой концепцией организовано производство компактных установок для глубокой очистки воды в коттеджах. Первые партии этих установок поступили потребителям. Принципиальная схема установки, выполненная в соответствии с выработанной концепцией, и соответствует приведенной на рис. 5. Первые испытания модельных и опытных образцов на пресной воде и минерализованных водных растворах полностью подтвердили справедливость новой концепции и позволили определить наименование данной технологической схемы, равно как и семейства установок для реализации этой схемы как ИЗУМРУД-УНИВЕРСАЛ.

В установке ИЗУМРУД-УНИВЕРСАЛ осуществляются последовательно следующие процессы: обработка воды в анодной камере первого электрохимического реактора с последующей фильтрацией, обработка воды, прошедшей первый фильтр последовательно в двух катодных камерах (в первом и втором электрохимическом реакторах) с последующей фильтрацией, обработка воды, прошедшей второй фильтр в анодной камере второго реактора с последующей фильтрацией. Анализ осадка с каждого из трех фильтров (рис. 6) экспериментальной установки ИЗУМРУД-УНИВЕРСАЛ позволил построить примерную химическую схему процессов, которые происходят в установке с четырьмя активными и тремя пассивными стадиями очистки.

Вода вначале поступает в анодную камеру проточного диафрагменного электрохимического реактора, представленного электрохимическим модульным элементом МБ или группой этих элементов (обозначение на схеме МВ1, рис.5). Давление в анодной камере МВ1 больше, чем в катодной камере. Под действием протекающего электрического тока происходит электромиграционное удаление части катионов металлов из воды через ультрафильтрационную диафрагму в катодную камеру.

Первая активная стадия очистки воды – первичная анодная электрохимическая обработка:



В природной пресной воде также практически всегда присутствует угольная кислота и ее соли. Большая часть углекислоты находится в виде свободного молекулярно растворенного газа  $\text{CO}_2$  и бикарбонатных ионов  $\text{HCO}_3^-$ . При обработке воды в анодной камере вода обогащается свободной углекислотой в результате реакций:

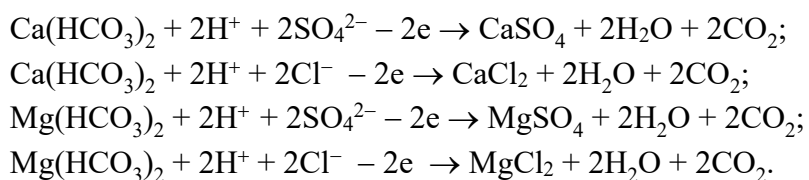


Рис. 6. Внешний вид десятимикронных фильтров экспериментальной установки ИЗУМРУД-УНИВЕРСАЛ-500 после 4 часов работы на пресной артезианской воде с содержанием ионов двухвалентного железа около 4 мг/л.

При традиционных методах удаления ионов двухвалентного железа и марганца чаще всего используют аэрацию (окисление путем барботаж воздуха), также в качестве окислителей используют хлор, озон, перманганат калия в процессе механической фильтрации воды на песчаной или антрацитовой загрузках. Однако эффективность указанных технологий низка, поскольку процесс окисления и формирования хлопьев достаточно длителен.

В анодной камере элементов МБ процесс окисления протекает практически мгновенно благодаря его совмещенным свойствам реактора идеального смешения и идеального вытеснения. Также в анодной камере уничтожается микробная

микрофлора всех видов и форм (бактерии, микобактерии, вирусы, грибы, споры), микробные токсины, другие органические соединения, в том числе, гербициды, пестициды, гормоны, антибиотики, антидепрессанты. Деструкция живой и неживой органической материи происходит в результате окисления продуктами анодных электрохимических реакций, а также благодаря прямому окислению в двойном электрическом слое (ДЭС) у поверхности анода. Процесс прямой окислительной деструкции органических соединений захватывает значительную часть объема протекающей воды благодаря особому характеру течения воды в зазоре между коаксиально расположенными цилиндрическим электродом (анодом) и диафрагмой. Суперпозиция гидродинамического и электростатического взаимодействия в движущемся ядре потока между электрически заряженной поверхностью электрода, генерирующей микропузырьки газов (озона, кислорода) и электрически заряженной поверхностью керамической ультрафильтрационной диафрагмы формирует структуру потока в виде множества микротороидальных струй, взаимодействующих с основным ядром потока и поступательно перемещающихся в кольцевом зазоре в электродной камере. Таким образом, в работающем элементе МБ, при протекании электрического тока и соответствующей скорости протока воды (обобщенно именуемой анолитом), анодная камера превращается в реактор двойного действия: идеального смешения и, одновременно, идеального вытеснения. Аналогичные процессы превращения электродной камеры в реактор идеального смешения и идеального вытеснения имеют место и в катодной камере элемента МБ при протекании тока с выделением электролизных газов

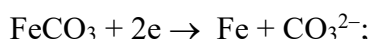
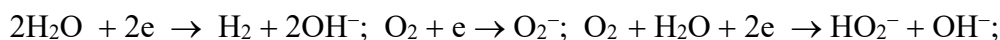
(преимущественно, водорода) на поверхности катода и соответствующей скорости потока, также обобщенно именуемой католитом.

Соединения двухвалентного марганца переводятся в четырехвалентные, двухвалентного железа – в трехвалентные.

Если значение рН исходной воды было примерно 7, то после первой стадии анодной обработки рН воды снижается приблизительно на 1,0 единицу рН.

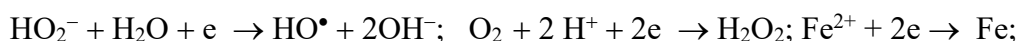
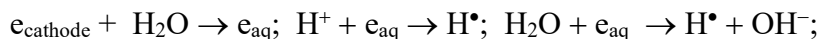
Все нерастворимые соединения – скоагулировавшая органика, железо, марганец – задерживаются фильтром F1, который выполняет функцию первой пассивной стадии очистки воды.

Вторая активная стадия очистки воды – первичная катодная электрохимическая обработка.



В результате катодной обработки воды в первом элементе МБ рН воды на выходе достигает значений  $7,5 \div 8,2$ .

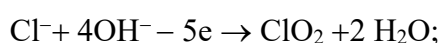
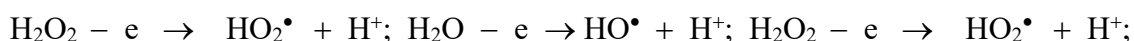
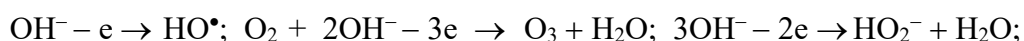
Третья активная стадия очистки воды – вторичная катодная электрохимическая обработка.



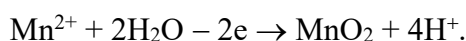
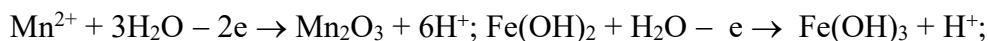
После выхода из катодной камеры второго элемента МБ вода приобретает рН в пределах около 9.

Ионы тяжелых металлов, железа, меди, цинка превращаются в нерастворимые гидроксиды и отделяются на фильтре F2 (вторая пассивная стадия очистки воды). Вода насыщается водородом и становится пригодной к вводу последней порции оксидантов в анодной камере элемента МБ2.

Четвертая активная стадия очистки воды – вторичная анодная электрохимическая обработка.



Органический марганец и железо:



В анодной камере элемента МБ2 происходит окисление органического двухвалентного железа и марганца, доокисление с одновременным укрупнением частиц всех тех примесей, которые прошли предыдущие ступени. Все скоагулировавшие частицы отделяются на фильтре F3, который представляет собой третью пассивную стадию очистки воды.

Применение фильтров с автоматической очисткой, например, путем обратной промывки, избавит пользователя от необходимости покупать сменные картриджи и позволит исключить операции ручной замены картриджей. Очистка установки будет сводиться только к периодическому автоматическому удалению осадка из фильтров и периодической промывке, также автоматической (на московской воде – один раз в год) всех камер электрохимических элементов лимонной или слабой соляной кислотой. Для того, чтобы кислота во время промывки электродных камер не накапливалась в фильтрах, предусмотрены байпасы с ручным (как на схеме) или автоматическим (при помощи



Рис. 7. Установка ИЗУМРУД-УНИВЕРСАЛ-500 в качестве основного универсального устройства очистки и кондиционирования воды в коттедже. При срабатывании датчика нижнего уровня очищенной воды в накопительной емкости вода из скважины с постоянным расходом 500 литров в час поступает в накопительную емкость, предварительно пройдя все стадии очистки в установке ИЗУМРУД-УНИВЕРСАЛ-500. При достижении верхнего уровня в накопительной емкости установка ИЗУМРУД-УНИВЕРСАЛ отключается. Станция повышения давления, соединенная с накопительной емкостью и подключенная к внутримдомовой системе водоразведения, обеспечивает чистой водой весь коттедж в любое время и в любом требуемом количестве.

концентрированных растворов природной каменной соли для приготовления рассолов в пищевой промышленности, а также исходных растворов для питания различных электрохимических установок, например, производящих гипохлорит натрия, хлор, гидроксид натрия. Еще одной областью использования подобных электрохимических систем очистки воды является подготовка исходной морской и пресной воды для плавательных бассейнов, а также постоянная очистка и кондиционирование воды в циркуляционной системе плавательных бассейнов. Установки большой производительности с такой же технологической схемой возможно использовать для очистки и кондиционирования воды в циркуляционной системе охлаждения тепловых электростанций, что предотвратит рост биопленок и образование солевых отложений в градирнях.

Такие установки можно просто и быстро подключить в любом месте, где будет производиться централизованная очистка воды для бутылирования. В качестве дополнительной конечной стадии обработки возможно использовать угольный фильтр любой конструкции. Также, при необходимости увеличить количество оксидантов в очищенной воде, например, с целью ударного воздействия на биопленки в начальный период подачи очищенной в установке воды в старую водораспределительную сеть, следует увеличить силу тока через второй (по движению воды) электрохимический реактор или использовать дополнительный реактор (электрохимический элемент), обеспечивающий только анодную обработку воды. Установки типа ИЗУМРУД-УНИВЕРСАЛ имеет смысл рекомендовать к использованию потребителям из некоторых Европейских стран, а также стран Ближнего Востока, Юго-Восточной Азии, Африки, Латинской Америки,

электромагнитных клапанов) переключением гидравлической схемы с рабочего режима очистки воды на режим промывки электродных камер и обратно, в рабочий режим очистки воды.

Данная установка с подобной технологической схемой очистки имеет большой потенциал для развития. В частности, ее можно использовать для обработки морской воды. Продуктом будет фактически Анолит АНК СУПЕР с очень низкой концентрацией оксидантов, на морской воде, очищенной от микроорганизмов, органических и неорганических вредных примесей. Именно такая вода необходима для выращивания молоди креветок и других морских обитателей. Эту же технологическую схему возможно использовать при очистке исходных

На рис. 7 - фото установки для очистки воды в коттедже ИЗУМРУД -УНИВЕРСАЛ производительностью до 500 литров в час. Так же, как ранее созданные установки серии ИЗУМРУД, но с гораздо большей эффективностью, обеспечивает очистку воды от железа, марганца, сероводорода, мутности, цветности, органических примесей (гербицидов, пестицидов, ПАВ, фенолов, антибиотиков, гормонов, антидепрессантов, анаболиков), ионов тяжелых металлов, микроорганизмов всех видов (бактерии, микобактерии, вирусы, грибы, споры), микробных токсинов. Производительность от 250 до 500 литров в час (регулируется). Работает в автоматическом режиме: включается при понижении уровня в накопительной емкости, подключенной к станции повышения давления. Замена картриджей на фильтрах производится вручную один раз в два месяца при потреблении воды около 15 кубометров в месяц.

Результаты сравнительного анализа качества воды из скважины глубиной 120 метров в Истринском районе Московской области приведены в таблице 1. Вода с общей минерализацией 0,3 г/л гидрокарбонатно-сульфатно-кальциево-магниевая из отложений каменноугольного периода Палеоцена подвергалась электрохимической очистке в установке ИЗУМРУД-УНИВЕРСАЛ-500. Расход воды составлял 420 л/ч, давление на входе в установку – 1,6 бар, сила тока – 5,7 ампер, напряжение 95 вольт.

Таблица 1.

Сравнительные результаты анализа качества очистки природной воды из скважины в установке ИЗУМРУД-УНИВЕРСАЛ-500.

Показатель	Результат измерения		Нормативное значение	Единицы измерения	Нормативный документ
	Исходная вода	Очищенная вода			
<b>Органолептические показатели</b>					
Мутность	1,6	1,2	2,6	ЕМФ	ГОСТ Р 57164-2016 (при 530 нм)
Цветность	15	10	20	градус	ГОСТ 31868-2012 (Метод Б)
Запах	1	0	2	балл	ГОСТ Р 57164-2016
<b>Металлы и металлоиды</b>					
Барий	0,095	0,001	0,1	мг/л	ЦВ 3.18.05-2005
Железо	3,102	0,001	0,3	мг/л	ЦВ 3.18.05-2005
Стронций	7,112	0,001	7	мг/л	ЦВ 3.18.05-2005
Медь	0,011	0,002	1	мг/л	ЦВ 3.18.05-2005
Цинк	0,087	0,003	5	мг/л	ЦВ 3.18.05-2005
Кремний	7,321	1,315	10	мг/л	ПНД Ф 14.1:2:4.215-06
Бор	0,270	0,005	0,5	мг/л	ЦВ 3.18.05-2005
<b>Обобщенные показатели</b>					
Жесткость	4,8	2,1	7	мг-экв/л	ГОСТ 31954-2012
Окисляемость перманганатная	3,3	0,8	5	мг/л	ПНД Ф 14.1:2:4.154-99
Хлор остаточный связанный	0	0	1,2	мг/л	ПНД Ф 14.1:2:4.113-97
Хлор остаточный свободный	0	0,01	0,5	мг/л	ПНД Ф 14.1:2:4.113-97
Сухой остаток	321	279	1000	мг/л	ПНД Ф 14.1:2:4.261-10
<b>Микробиологические показатели</b>					
Общее микробное число (ОМЧ)	247	0	50	КОЕ/мл	МУК 4.2.1018-01



Сопоставление полученных при тестовых исследованиях параметров исходной и очищенной воды, которые являются маркерами для оценки эффективности технологии и технической системы, свидетельствует о перспективности и высокой эффективности технологии очистки воды в электрохимических системах типа ИЗУМРУД-УНИВЕРСАЛ.

**Заключение.** Серафим Саровский говорил: «Пей там, где конь пьет. Конь плохой воды не будет пить никогда». За неимением коня, технология очистки воды была проверена на кошках. Во всех случаях, кошки из двух вариантов выбирают воду, очищенную в установке ИЗУМРУД - УНИВЕРСАЛ при том, что в качестве базы сравнения им предлагается исходная природная неочищенная вода из скважины или бутылированная вода «Эвиан».



Источники информации.

1. Герловин И. Л. Основы единой теории всех взаимодействий в веществе. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1990. – 432 с.
2. Bakhir V.M., Pogorelov A.G. Universal Electrochemical Technology for Environmental Protection. International Journal of Pharmaceutical Research & Allied Sciences, 2018, 7(1):41-57. ISSN : 2277-3657 CODEN(USA) : IJPRPM. Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow region, Pushino, Russia
3. Бахир В.М. Акватрон: новые электрохимические системы с элементами МБ. // Водоснабжение и канализация. – 2016, -№5-6. – С. 40 – 56.
4. Бахир В.М., Атаджанов А.Р., Мамаджанов У.Д., Алехин С.А., Мариампольский Н.А., Наджимитдинов А.Х., Активированные вещества. Некоторые вопросы теории и практики // Известия АН УзССР. Сер.техн.наук. – 1981. - № 5.
5. Бахир В.М., Кирпичников П.А., Лиакумович А.Г., Спектор Л.Е., Мамаджанов У.Д. Механизм изменения реакционной способности активированных веществ // Известия АН УзССР. Сер. техн.наук. – 1982. - №4. - С.70-74.
6. Бахир В.М., Спектор Л.Е., Мамаджанов У.Д. Физическая природа явлений активации веществ // Известия АН УзССР. Сер. техн. наук. – 1983. - № 1.
7. Кирпичников П.А., Бахир В.М., Гамер П.У., Добренъков Г.А., Лиакумович А.Г., Фридман Б.С., Агаджанян С.И. О природе электрохимической активации сред // Доклады АН СССР. - 1986. - Т. 286. - № 3. - С. 663-666.
8. Бахир В.М. Электрохимическая активация. - М.: ВНИИИ мед. техники,1992. - 2 ч. - 657 с; - ил.
9. Бахир В.М., Задорожний Ю.Г., Леонов Б.И., Паничева С.А., Прилуцкий В.И. Электрохимическая активация: очистка воды и получение полезных растворов. - М.: Маркетинг Саппорт Сервисиз, 2001. - 176 с.; - ил.
10. Бахир В.М., Задорожний Ю.Г., Леонов Б.И., Паничева С.А., Прилуцкий В.И. Электрохимическая активация: универсальный инструмент зеленой химии. - М.: Маркетинг Саппорт Сервисиз, 2005. - 176 с.; - ил.
11. Бахир В.М. Электрохимическая активация: изобретения, техника, технология. – М.: Вива-Стар, 2014. - 511 с.; - ил.
12. UK Patent 2 253 860 B, 12.03.1991. The electrochemical treatment of water and a device for electrochemically treating water. / Bakhir V.M., Zadorozhny Y.G.
13. UK Patent 2 257 982 B, 24.07.1991. An electrolytic method of drinking water purification. / Bakhir V.M., Zadorozhny Y.G.
14. Патент РФ № 2038322, 1992. Устройство для электрохимической обработки воды. / Бахир В.М., Задорожний Ю.Г., Леонов Б.И., Веденков В.Г.
15. Патент РФ № 2076847, 1995. Устройство для получения моющих и дезинфицирующих растворов. / Бахир В.М., Задорожний Ю.Г., Барабаш Т.Б.

16. Патент РФ № 2079575, 1995. Устройство для получения моющих и дезинфицирующих растворов. / Бахир В.М., Задорожний Ю.Г., Барабаш Т. Б.
17. Патент РФ № 2088539, 1995. Устройство для получения моющих и дезинфицирующих растворов. / Бахир В.М., Задорожний Ю.Г., Барабаш Т.Б.
18. USA Patent № 5 628 888, 1997. Apparatus for Electrochemical Treatment of Water and/or Water Solutions. Bakhir V.M., Zadorozhny J.G.
19. USA Patent № 5 871 623, 1999. Apparatus for Electrochemical Treatment of Water and/or Water Solutions. Bakhir V.M., Zadorozhny J.G., Barabash T.B.