

Охрана окружающей среды

УДК 621.039.73

Петров С.В., докт. техн. наук

Институт газа НАН Украины, Киев

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: petrov.st.v@nas.gov.ua

Плазменная очистка воды и грунта от тяжелых металлов и радионуклидов

Выполнены исследования по созданию универсальной технологии и оборудования обработки водных растворов объемно-рассеянным плазменно-дуговым разрядом на поверхности фазового раздела газ — жидкость (поверхность пузырьков в воде) для извлечения тяжелых металлов, радионуклидов, обеззараживания, активирования без внесения посторонних веществ. Основной упор сделан на стабилизацию электро-пнеumo-гидравлического режима в зоне объемного рассеянного разряда для условий промышленного использования. Приведены данные по плазменной очистке воды и грунта от тяжелых металлов и радионуклидов в префектуре Фукусима, загрязненных в результате аварии на АЭС. Показано, что использование плазмы в технологии обеззараживания воды перспективно для промышленного применения. Установки плазмохимической обработки воды не требуют специальных помещений и могут эксплуатироваться в стационарном или мобильном вариантах для очистки и обеззараживания сточных вод различного происхождения и в разном количестве. Затраты на обработку воды по данной технологии не выше, чем традиционными методами. *Библ. 10, рис. 5, табл. 4.*

Ключевые слова: объемно-рассеянный плазменно-дуговой разряд, пузырьковая жидкость, очистка воды от радионуклидов.

Настоящая работа посвящена очистке водных растворов от тяжелых металлов и радионуклидов. Задача заключается в доведении состояния очищенной воды по химическим и биологическим показателям до уровня, позволяющего производить ее сброс в водоемы при полном соответствии требованиям действующих санитарных норм и минимальных энергозатратах.

Цель работы — создание универсального способа обработки водных растворов объемно-рассеянным плазменно-дуговым разрядом на поверхности фазового раздела газ — жидкость (поверхность пузырьков в воде) для извлечения тяжелых металлов, радионуклидов, обеззараживания, активирования без внесения посторонних веществ.

Электрические разряды в воде имеют свойство очищать ее от микробных и химических загрязнений за счет вклада в инициирование химических реакций продуктов взаимодействия разряда с водой. Эти свойства разряда стали использовать в промышленных технологиях очистки воды [1–3]. В той или иной форме вопросы возникают при обращении с жидкими радиоактивными отходами и в настоящее время стоят очень остро во многих странах. Переработка таких отходов направлена на решение двух главных задач: очистки основной массы отходов от радионуклидов и концентрирование последних в минимальном объеме, удобном для дальнейшей локализации [4, 5].

Утилизация радиоактивных отходов является сложной проблемой ядерной энергетики [6]. В поисках ее решения выполнено колоссальное количество работ, создано множество технологий. Однако можно утверждать, что не все вопросы выяснены, а векторы расставлены правильно. Опыт ликвидации последствий аварий на атомных станциях Чернобыль и Фукусима свидетельствует о том, что существующая система обращения с радиоактивными отходами в реальных условиях имеет недостатки, а необходимые для эффективного решения актуальных практических задач технологии отсутствуют [7]. Выход из такой ситуации на практике заключается в развитии и использовании новых нетрадиционных технологий. Для решения указанной задачи в данном исследовании используется особая форма квазистационарного объемного (рассеянного) электрического разряда в пористой (пузырьковой) жидкости, возбуждаемого в плазменном модуле.

В статье приведены результаты исследований основных стадий процессов, которые лежат в основе комплексной технологии очистки воды от различного рода загрязнителей (биологических, органических, неорганических) с применением рассеянного плазменно-дугового разряда на поверхности фазового раздела газ — жидкость.

Характеристики разряда: 1) возрастающая вольт-амперная характеристика в диапазоне 1000–3000 В при токе разряда 2–20 А; 2) сопротивление разрядного промежутка 50–1500 Ом; 3) разряд может сопровождаться эрозией электродов, в результате чего в растворе образуются высокоактивные микро- и наночастицы оксидов металлов электродов; 4) при горении разряда возникают колебания тока в диапазоне частот до 100 МГц, с максимумом спектра в области частот 5–10 МГц и интенсивным образованием микропузырьков. Такая пузырьковая среда обладает развитой поверхностью раздела фаз.

Ситуация в рабочей зоне плазменного модуля близка к обычной для плазмохимии. Генерируемые в плазме активные частицы диффундируют к границе раздела фаз и инициируют химические превращения в растворе. Поскольку ток разряда проходит через электролит, это существенно меняет свойства границы раздела фаз плазма — жидкость. При этом плазма создается в атмосфере исходного плазмообразующего газа (воздух, углекислый газ, их смеси и др.) с парами растворителя или в паровой оболочке, образующейся внутри жидкой фазы вследствие перегретой неустойчивости. Электрический разряд в водном растворе генерирует активные соединения (ими могут быть свобод-

ные атомы, ионы, радикалы, возбужденные молекулы) и инициирует физико-химические процессы. Это дает возможность совместить генерирование необходимых активных соединений (АС) и водный раствор, подлежащий обработке, в одном месте и в одно время.

При этом обеспечивается одновременное воздействие на очищаемую воду активных частиц и таких факторов, сопутствующих электрическому разряду, как ультрафиолетовое излучение, озон, электрическое и магнитное поля, кавитация и др. Кроме того, происходит насыщение обрабатываемой воды высокоактивными, с большой удельной поверхностью, нанодисперсными частицами оксидов, гидроксидов железа, алюминия, которые непрерывно образуются в результате плазмохимических реакций расходоуемых электродов с паровоздушной смесью в электрическом разряде. Такая водная дисперсия наноструктур и ионов материала электродов обладает качествами естественных сорбентов и коагулянтов, способствующих осаждению примесей.

При питании плазменного модуля переменным напряжением к растворению материала электрода в положительный полупериод приложенного напряжения (анода) добавляется испарение того же электрода в отрицательный полупериод (катода). Данное комплексное воздействие с учетом реакционной способности у образовавшихся радикалов (даже короткоживущих) является очень эффективным. В итоге энергия, запасенная в разряде, идет на уничтожение микрофлоры и разрушение загрязнений органического и неорганического характера. Органические соединения газифицируются, в основном окисляясь до углекислого газа и воды. Соли тяжелых металлов переходят в нерастворимые гидроксиды или карбонаты и выпадают в осадок, который может быть легко удален. Эти особенности делают метод, использующий дуговой объемный разряд в двухфазной водно-пузырьковой среде, потенциально подходящим для комплексной очистки химически сильно загрязненных вод. Для повышения глубины очистки плазменные модули могут включаться последовательно, а производительности — параллельно либо комбинированно.

Применение АС является практически безотходным способом очистки, поскольку они синтезируются из кислорода воздуха и воды, а продуктом распада также являются кислород и вода, то есть в процессе очистки не происходит образования вторичных загрязнений растворов. АС являются одним из немногих окислителей, участвующих в природных химических и биохимических процессах, следствием чего является

их совместимость (до определенных пределов) с окружающей средой. Получение АС в ходе непосредственной обработки растворов устраняет необходимость в получении и хранении больших количеств реагентов для их обработки.

Поскольку скорости химических реакций практически экспоненциально зависят от температуры, то высокий ее уровень в данном процессе и градиенты параметров делают процесс чувствительным к их колебаниям и флуктуациям параметров разряда. Таким образом, для обеспечения точности выходных параметров (температура, электропроводность, рН обработанной воды, производительность) и воспроизводимости химического и фазового составов осажденных продуктов очистки воды необходима стабилизация электро-пнеumo-гидравлического режима в зоне объемного рассеянного разряда во всем рабочем диапазоне. Схема установки плазмохимической очистки и обеззараживания водных растворов приведена на рис.1.

Водный раствор подают в нижнюю часть рабочего объема плазменного модуля. В него также вдувают через струйный диспергатор-формирователь рабочий газ (воздух, углекислый газ или их смесь). Сформированная в сопле диспергатора водно-пузырьковая струя направляется вверх вдоль стенки модуля. В зоне расположения электродов вся жидкость в рабочем объеме плазменного модуля равномерно заполняется газовыми пузырьками. Газожидкостная смесь проходит последовательно через зону объемного рассеянного электрического разряда, горящего между электродами, технологический канал и выходит наружу. Всплывающие пузыри на выходе технологического канала сливаются, увеличиваются в размерах и образуют структуры случайной формы. Стабилизация рабочих параметров при обработке водных растворов обеспечивается благодаря совокупности использования различных операций и физических эффектов. Диспергирование рабочего газа происходит в затопленной сверхзвуковой струе. Сверхзвуковое истечение газа в жидкость приводит к формированию отчетливой сплошной струи, которая затем дробится в связи с падением скорости движения газа и воздействием возмущающего движения жидкости в пограничном слое.

Течение газовой струи, затопленной в воде, является автомодельным, и при расчетах могут

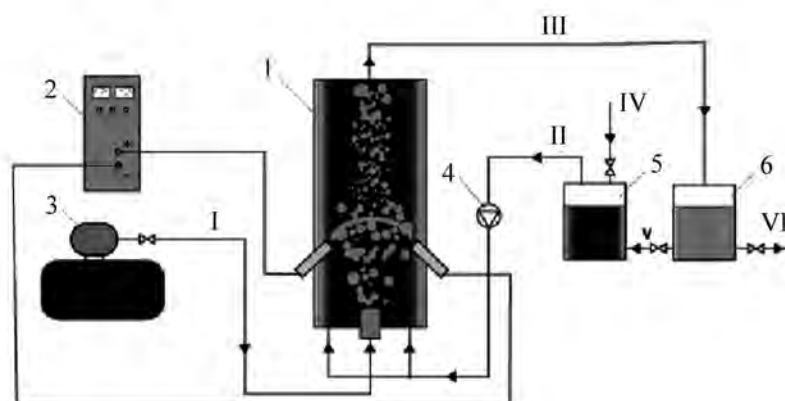


Рис.1. Схема установки плазмохимической очистки и обеззараживания водных растворов: 1 – плазменный модуль; 2 – источник электропитания; 3 – компрессор; 4 – насос; 5, 6 – емкости с загрязненной и очищенной водой; I – линия подачи воздуха в плазменный модуль; II – линия подачи загрязненной воды в плазменный модуль; III – линия отвода очищенной воды из плазменного модуля; IV – подача загрязненной воды; V – подача воды на доочистку; VI – магистраль отвода очищенной воды.

быть применены известные зависимости [8]. На рис.2 приведено распределение динамических напоров вдоль оси струи с характерной волновой структурой на начальном участке. При больших скоростях истечения газа в жидкость вихревые движения жидкости в зоне проникновения газа усиливаются и вызывают дробление газовой струи на границе раздела фаз. В первом приближении характерные размеры образующегося деформированного пузыря пропорциональны радиусу отверстия внутреннего сопла диспергатора. Далее по течению при большом объемном газосодержании, определяемом как отношение объемов газа к воде ($\phi > 0,3$), обычно, если не будут приняты специальные меры, происходит переход от пузырькового режима течения в поршневой [9].

Стабильное пузырьковое течение в требуемом технологическом диапазоне при $0,3 < \phi < 0,9$

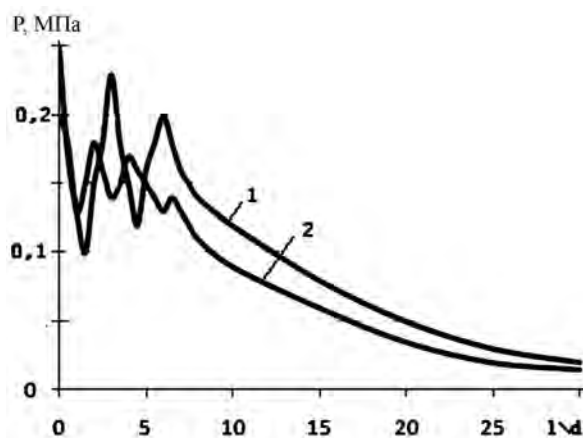


Рис.2. Изменение давления вдоль оси сверхзвуковой струи газа, истекающей в жидкость, при числе Маха 2,0 (1) и 1,5 (2).

непросто организовать и нет возможности объединить разрозненные теоретические и экспериментальные данные в стройную систему, позволяющую обеспечить инженерные расчет и проектирование плазменных устройств с течением газожидкостных сред при наличии физико-химических превращений и электрического разряда при высоком объемном газосодержании ($\phi > 0,3$).

Газожидкостная среда при $\phi > 0,3$ имеет две качественные особенности, сильно отличающие ее от газа и жидкости: 1) скорость звука в ней может быть на порядок меньше скорости звука в газе и на два порядка меньше, чем в жидкости [8] (это открывает новые возможности для плазменной обработки, так как во фронте ударной волны вследствие адиабатического сжатия могут возникать высокие температуры, что благоприятствует электрическому пробую и наработке радикалов); 2) наличие большой удельной поверхности раздела фаз газ – жидкость (это приводит к ускорению протекания гетерогенных реакций). Скорости этих реакций возрастают также при уменьшении диаметра пузырьков.

Результаты измерений подтвердили теоретические положения, что основным механизмом дробления пузырьков является возмущение поверхности раздела фаз за счет больших касательных напряжений. С увеличением числа Маха примерно до 1,6 средний диаметр пузырьков монотонно уменьшается. При работе с числом Маха более 1,6 падает дальнобойность газопузырьковой струи вследствие усиления волновой структуры на начальном участке газовой струи и соответственно крупномасштабной турбулентности, что приводит к росту среднего диаметра пузырьков.

Оптимизация диспергатора с учетом указанных закономерностей обеспечивает упорядоченное заполнение рабочего объема плазменного модуля в межэлектродном зазоре пузырьками фракции 0,5–1,5 мм. Сформированная в диспергаторе газопузырьковая струя направляется вверх на электроды. У стенки рабочего канала плазменного модуля наблюдается провал газосодержания и частота прохождения пузырьков здесь падает почти до нуля. Благодаря этому и автономности ее параметров струя «прилипает» к стенке в соответствии с эффектом Коанда. При встрече с электродом газопузырьковая струя скользит по его поверхности от места входа в рабочую полость к концу и заполняет пузырьками воду в межэлектродном зазоре.

Установлено, что с поверхностью электрода контактирует только вода, разрывы водяной пленки из-за пузырьков отсутствуют. Это обеспечивает непрерывный ионный безразрядный токоперенос

с жидкости на электроды и определяет предпробойные условия. Приэлектродные пятна дугового разряда после пробоя в плазменном модуле всегда сносятся потоком на торец электрода. Горение дугового разряда с боковой поверхности электрода исключается. Это создает условия для стабилизации привязки приэлектродных пятен разряда на торец электрода и соответственно равномерное растворение материала электрода в положительный полупериод приложенного напряжения (анода) и испарение того же электрода в отрицательный полупериод (катода).

Важным фактором стабильности является обеспечение условия безразрядного токопереноса до 0,4–0,7 амплитудного значения переменного напряжения с регулярным пробоем разрядного промежутка на каждом полупериоде приложенного переменного напряжения при достижении мгновенного значения напряжения 0,4–0,7 максимального. Это условие практически не зависит от частоты приложенного напряжения и проверено экспериментально на частотах 50, 5000, 30000 Гц. Выбор напряжения зависит от электропроводности водных растворов, которая может меняться от 30 до 500 мС/м, и величины межэлектродного зазора. Площадь электрода, контактирующую с водным раствором, следует выбирать из условия достаточности плотности тока, поскольку она является предпосылкой пробоя.

Типичная осциллограмма изменения тока и напряжения при частоте питающего напряжения 50 Гц приведена на рис.3. На рис.4 приведена зависимость напряжения на электродах от величины межэлектродного зазора и электропроводности водного раствора.

На осциллограммах отчетливо фиксируется факт рассеянного разряда после пробоя. Он характеризуется значительной пульсацией тока и высокочастотной составляющей. Это происходит благодаря развитию и отмиранию в пузырь-

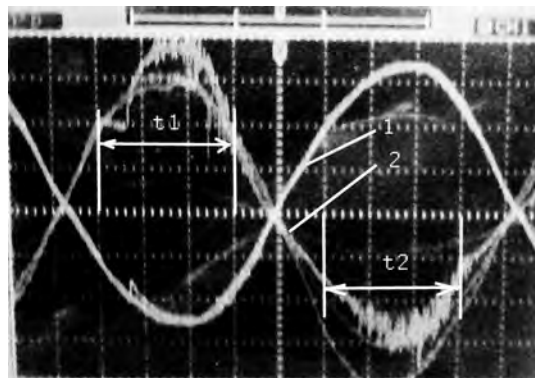


Рис.3. Осциллограмма напряжения (1) и тока (2): t_1 , t_2 — время горения электрического разряда соответственно в положительный и отрицательный полупериод.

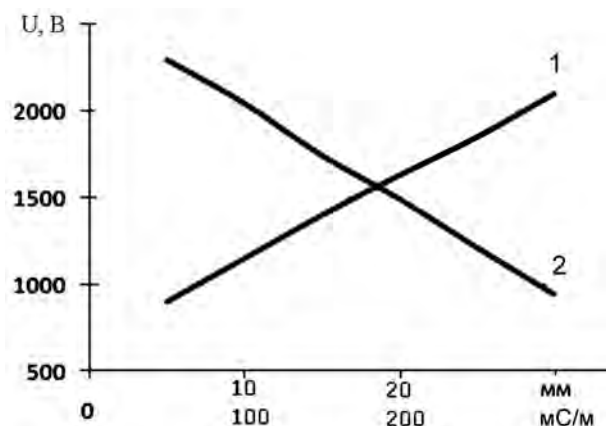


Рис. 4. Зависимость напряжения на электродах плазменного модуля от величины межэлектродного зазора (1) при электропроводности 150 мС/м и электропроводности водного раствора (2) при межэлектродном зазоре 25 мм.

как множественных дуговых каналов со временем жизни 10^{-5} – 10^{-6} с [9]. Такой сверхбыстрый локальный разогрев и охлаждение поверхности пузырьков приводит к образованию возбужденных молекул и радикалов с концентрацией, значительно превышающей равновесную, и к их закалке.

Условия пробоя в объеме и у поверхности электродов разные. В объеме пробой происходит в газовой фазе по поверхности пузырьков. Затем пробой распространяется через область, где находится пузырек дальше в жидкость. Поскольку пузырьки отжимаются от поверхности электродов, то здесь происходит пробой жидкости в пограничном слое.

Оставляя в стороне рассмотрение многообразных плазмохимических реакций и их механизмы, остановимся на технологически значимых явлениях. По оценкам, выполненным согласно [2], концентрации озона в газовой и жидкой фазах в условиях разряда становятся соизмеримы и достигают 3 %, что чрезвычайно важно при промышленной реализации. Озон генерируется в воздухе и посредством барботирования поставляется в воду. Наличие большого количества озона дает возможность сохранить радикалы и транспортировать озонно-гидроксильную смесь за пределы реактора. Для того, чтобы получить радикалы ОН и другие, время жизни которых составляет ≤ 1 с, необходимо производить разряд у поверхности воды. После пробоя пузырька канал разряда развивается по его поверхности и горит в смеси газа, заполняющего его, с парами водного раствора. Активные частицы, полученные в плазме, могут расходоваться двумя способами: гибнуть во взаимодействиях

между собой, либо участвовать в реакциях с растворенными в воде веществами.

Прежде всего нас интересует условие, при котором частицы не будут бесполезно пропадать. Расчеты свидетельствуют: для того, чтобы активные радикалы расходовались в основном на взаимодействие с примесью, содержащейся в воде, их концентрация должна зависеть от концентрации примеси и не быть излишне большой. Согласно оценкам, концентрация радикалов должна быть существенно меньше 10^{16} частиц в 1 см^3 . Такая плотность частиц характерна для слабоионизированной плазмы. Конкретные условия разряда должны определяться конкретной реакцией, то есть концентрацией примеси в воде, толщиной обрабатываемого слоя, константой скорости реакции. При сильном увеличении тока разряда будет генерироваться слишком много активных частиц и эффективность реакции будет падать, а энергозатраты на ее осуществление увеличиваться. При небольших объемах газа (менее 30 %) концентрация радикалов велика и велика скорость их взаимного уничтожения, а при слишком большом объеме газа (более 90 %) концентрация активных частиц мала и мал их поток в жидкость для окисления растворенного вещества.

В целом сложные задачи очистки воды базируются на высокоэффективной окислительной технологии. Основную роль при взаимодействии с примесями воды играют гидроксильные радикалы. В этой связи актуальным является вопрос времени жизни озонно-гидроксильной смеси. По оценкам, в рассеянном плазменно-дуговом разряде образуется озонно-гидроксильная смесь, время жизни которой около 1 с. Таким образом, при стационарной концентрации активных частиц их можно транспортировать на значительные расстояния.

Таким же или более должно быть время нахождения частиц воды в рабочем объеме плазменного модуля. Поскольку производительность процесса и глубина очистки зависят от количества активных частиц в воде, то оптимизация технологии направлена также на решение задачи высокого выхода активных частиц и их транспорт из газа в воду. Эффективность очистки зависит в значительной степени от отношения площади поверхности раздела фаз к объему газа, в котором происходит разряд.

Описанные выше меры обеспечивают минимизацию размеров пузырьков в зоне разряда и при дальнейшем движении газо-жидкостного потока до выхода за пределы рабочего объема плазменного модуля. Здесь идут конкурирующие процессы: турбулентное дробление и рост



Рис.5.Пилотная передвижная установка плазменнодуговой очистки воды (а) и транспортный модуль (б).

пузырьков вследствие увеличения объема газа из-за тепловыделения при горении дуги на поверхности [9], снижения поверхностного натяжения и их слияния. Интенсификации турбулентного дробления пузырьков способствуют увеличение давления и несферичности, снижение поверхностного натяжения.

На основании выполненных исследований и с учетом вышеизложенных положений плазмохимии создан пилотный передвижной комплекс (рис.5) и проведены испытания очистки воды от солей тяжелых металлов и радионуклидов. В табл.1 приведены демонстрационные результаты плазмохимической обработки воды, загрязненной солями тяжелых металлов. Из нее видно, что степень очистки не одинакова по отношению к различным элементам, а концентрация анализируемого компонента может быть уменьшена на порядок. Такое уменьшение зависит от кратности обработки раствора и технологических параметров процесса.

Решению проблемы очистки почвы от радионуклидов может способствовать использование перспективной технологии гидросепарации с плазмохимической коагуляцией. Установлено, что большая часть радиоактивности аккумулируется в мельчайших частицах верхнего плодородного слоя почвы. Наиболее эффективным способом выделения мелкой фракции является

Таблица 1. Результаты плазмохимической обработки воды с солями тяжелых металлов

Раствор в технической воде	Анализируемый компонент	Концентрация компонента в растворе, мг/л		Циклы обработки, шт.
		исходном	обработанном	
CuSO ₄	медь	33,6	3,3	2
ZnCl ₂	цинк	3300	365	2
KMnO ₄ *	марганец	109,2	8,1	2
PbNO ₃	свинец	1,4	0,16	2
CdI ₂	кадмий	2,4	0,6	1

* В дистиллированной воде

гидросепарация [10]. При этом снимается верхний слой почвы, отделяются крупные (> 10 мм) включения, диспергируется почвенная масса в водном растворе, классифицируется по размерам, отделяется крупная фракция и возвращается как чистый грунт на место отбора. Очищенная почва составляет 85–90 % первоначального объема. Однако, только гидросепарация имеет невысокий коэффициент очистки (около 5). Если наиболее загрязненная мелкодисперсная фракция, содержащая около 95 % радиоактивных веществ, подвергается дополнительной реагентной обработке, обезвреживается и осадок направляется на захоронение как радиоактивные отходы, коэффициент очистки повышается примерно до 200, а объем отходов, направляемых на захоронение, снижается почти в 20 раз [3, 4].

Сущность технологии гидросепарации с плазмохимической коагуляцией заключается в постоянном насыщении промывочной воды сорбентами радионуклидов, которые непрерывно образуются в результате плазмохимических реакций расходуемых электродов с паровоздушной смесью в электрическом разряде, горящем в промывочной воде. Эти частицы очищают грунт от радиоактивных нуклидов и удаляются из раствора вместе с мелкой фракцией грунта, на которой адсорбирована большая часть радионуклидов. Убыль «грязных» наночастиц и поступление в промывочную воду «чистых» уравновешены. Промывочная вода практически не загрязняется. Предлагается комбинирование методов, основными из которых являются синтез с помощью плазмы мелкодисперсного селективного сорбента с одновременной сорбцией и соосаждением радионуклидов.

В результате аварии на Чернобыльской АЭС установлено, что из всех продуктов деления урана по прошествии нескольких десятков лет основными дозообразующими являются катионы щелочных (Cs-137, Cs-134) и щелочноземельных (Sr-90) металлов. Для очистки жидких радиоактивных отходов от радионуклидов цезия совместимым с плазменной обработкой является осадительный метод, основанный на селективном осаждении цезия с осадками ферроцианидов переходных металлов. В данном случае используются мелкодисперсные композиционные ферроцианидные сорбенты.

Сорбенты данного типа получены нами вследствие осаждения ферроцианида соответствующего металла в присутствии синтезированного в зоне плазменной обработки мелкодисперс-

Таблица 2. Результаты очистки радиоактивно зараженной воды

Загрязнение	Загрязненная вода	Очищенная вода	Нижний предел анализа
Иод-131, Бк/кг	–	–	10
Цезий-134, Бк/кг	7400	110	10
Цезий-137, Бк/кг	11000	160	10

Примечание. Дата забора: 27.02.12, время забора: 10:30 – загрязненная вода, 14:30 – очищенная вода.

Таблица 3. Результаты очистки радиоактивно зараженной воды

Загрязнение	Загрязненная вода	Очищенная вода
Стронций, мг/л	22,0	10
Цезий, мг/л	38,0	≤ 0,05

Примечание. Дата забора: 10.12.12.

Таблица 4. Результаты очистки радиоактивно зараженной воды после промывки грунта

Загрязнение	До очистки	После очистки
Стронций, мг/л	65	18
Органика 1, мг/л	6600	860
Органика 2, мг/л	6600	160
Цезий-134, Бк/л	4400	59
Цезий-137, Бк/л	8100	110

Примечание. Дата забора: 18.12.12.

ных карбонатов кальция и стронция. Содержание ферроцианида переходного металла в композиционном сорбенте достигает 50 % (мас.). Такие мелкодисперсные сорбенты по сравнению с гранулированными материалами обладают следующими преимуществами: повышенными избирательностью и скоростью извлечения более чем в 100 раз радионуклидов из многокомпонентных водных растворов, так как соосаждение микроколичеств цезия с осадками ферроцианидов переходных металлов (Ni, Co, Cu, Fe) происходит практически в момент синтеза сорбента в химически активной зоне рассеянного плазменного разряда, когда еще поверхность сорбента наиболее активна.

В присутствии органических веществ ресурс сорбентов снижается в несколько раз. Негативное влияние органических комплексообразующих веществ связано с растворением ферроцианидной составляющей за счет комплексообразования с ионами переходного металла. Однако высокая температура плазмы обеспечивает выгорание органических веществ, причем это происходит несколько раньше (ниже по течению), до синтеза сорбента. Исследование электроэрозионных порошков и суспензии методом просвечивающей электронной микроскопии показало, что в полученных порошках имеются

частицы размером от единиц нанометров до единиц микронов. Механизм извлечения ионов тяжелых металлов из растворов состоит в том, что при действии разряда происходит образование гидроксидов железа из материала электродов, которые эффективно их осаждают.

В Японии (г. Дате, префектура Фукусима) под руководством автора выполнены тестовые испытания процесса плазменного соосаждения радионуклидов Cs-137, Cs-134 и Sr-90 в реальных условиях гидросепарации зараженного грунта с плазмохимической коагуляцией на передвижном плазмохимическом комплексе. Результаты приведены в табл. 2–4.

Выводы

Определены условия стабилизации электропневмо-гидравлического режима в зоне объемного рассеянного электрического разряда в газодисперсной среде во всем рабочем диапазоне. Созданы универсальные технология и оборудование обработки водных растворов объемно-рассеянным плазменно-дуговым разрядом на поверхности фазового раздела газ – жидкость (поверхность пузырьков в воде) для извлечения тяжелых металлов, радионуклидов, обеззараживания, активирования без внесения посторонних веществ.

На практике доказано, что использование плазмы в технологии обеззараживания воды является перспективным для промышленного применения и имеет такие преимущества: отсутствие образования побочных продуктов и высокая эффективность. Установки плазмохимической обработки воды не требуют специальных помещений и могут эксплуатироваться в стационарном или мобильном вариантах для очистки и обеззараживания сточных вод различного происхождения и в разном количестве. Затраты на обработку воды по данной технологии не превышают затрат по сравнению с традиционными методами.

Список литературы

1. Быков А.А. Исследование газожидкостных течений и характеристик электрического разряда в процессах очистки промышленных и бытовых сточных вод : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2011. – 24 с.
2. Аристова Н.А., Пискарев И.М. Генераторы озонно-гидроксильной смеси и их применение. – М., 2005. – 26 с. – (Препринт / Науч.-исслед. ин-т ядер. физики Моск. гос. ун-та; 2005-15/781).
3. Петров С.В., Хомма М. Плазменная очистка загрязненных вод // Автомат. сварка. – 2012. – № 6. – С. 58–59.
4. Никифоров А.С., Куличенко В.В., Жихарев М.И. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 183 с.

5. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами. — Вена : МАГАТЭ, 2005. — 220 с.
6. Андрушин И.А., Юдин Ю.А. Обзор проблем обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом. — Саратов: ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2010. — 119 с.
7. Сейда В.А., Цивун А.П. Проблемные вопросы обращения с радиоактивными отходами на ЧАЭС // Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения : Науч.-техн. сб. — 2012. — Вып. 10. — С. 40–53.
8. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. — М. : Наука, 1987. — Т. 1. — 459 с.
9. Петров С.В., Бондаренко С.Г., Рубець Д.І., Саванчук О.В., Янюк В.А. Моделивання поведінки повітряної бульбашки в полі стаціонарного дугового розряду // Восточно-европ. журн. передових технологій. — 2013. — № 3/5. — С. 73–78.
10. Михейкин С.В. Очистка грунта методом гидросепарации // Безопасность окружающей среды. — 2006. — № 3. — С. 48–50.

Поступила в редакцию 16.09.13

Петров С.В., докт. техн. наук

Институт газу НАН України, Київ

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: petrov.st.v@nas.gov.ua

Плазмове очищення води й ґрунту від важких металів та радіонуклідів

Виконано досліді щодо створення універсальної технології та обладнання обробки водних розчинів об'ємно-розсіюваним плазмово-дуговим розрядом на поверхні фазового розділу газ — рідина (поверхня бульбашок у воді) для вилучення важких металів, радіонуклідів, знезараження, активації без внесення сторонніх речовин. Основну увагу приділено стабілізації електро-пневмо-гідравлічному режиму в зоні об'ємного розсіюваного розряду для умов промислового застосування. Наведено дані з плазмового очищення води й ґрунту від важких металів та радіонуклідів у префектурі Фукусіма, забруднених в результаті аварії на АЕС. Показано, що використання плазми у технології знезараження води є перспективним для промислового використання. Установки плазмохімічної обробки води не потребують спеціальних приміщень та можуть експлуатуватися у стаціонарному або мобільному варіантах для очищення та знезараження стічних вод різного походження та у різній кількості. Витрати на обробку води за даною технологією не вище, ніж за традиційними методами. *Бібл. 10, рис. 5, табл. 4.*

Ключові слова: об'ємно-розсіюваний плазмово-дуговий розряд, бульбашкова рідина, очищення води від радіонуклідів.

Petrov S.V., Doctor of Technical Science

The Gas Institute of National Academy of Science of Ukraine, Kiev

39, Degtyarivska St., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: petrov.st.v@nas.gov.ua

Plasma Purification of Water and Soil from Heavy Metals and Radioactive Nuclides

Research was carried out to develop the versatile technology and equipment for treatment of water solutions by the volumetric-scattered plasma-arc discharge at the gas-liquid interface (surface of bubbles in water) to extract heavy metals and radioactive nuclides, disinfect and activate by adding no foreign substances. The emphasis was made on stabilisation of the electric-pneumohydraulic mode in the volumetric-scattered discharge zone. The data are given on plasma purification of water and soil from heavy metals and radioactive nuclides in the Fukushima prefecture, which were contaminated as a result of the nuclear power plant accident. It is shown that the use of plasma in the technology of disinfection of water holds promise for commercial application. The units for plasma chemical treatment of water require no special premises. They can be of a stationary or

mobile type and be used for purification and disinfection of sewage waters of different origins and in different amounts. The cost of treatment of water by using this technology does not exceed that by using traditional methods. *Bibl. 10, Fig. 5, Table 4.*

Key words: volumetric-scattered plasma-arc discharge, bubble liquid, purification, radioactive nuclides.

References

1. Bykov A.A. Investigation of gas-liquid flows and characteristics of electric discharge in the processes of purification of industrial and domestic sewage waters : Abstract of theses for candidate of technical science, Moscow, 2011, 24 p. (Rus.)
2. Aristova N.A., Piskarev I.M. Ozone-hydroxyl mixture generators and their application. Moscow, 2005, 26 p. (Preprint of the Institute of Nuclear Physics of Moscow State University, 2005-15/781. (Rus.)
3. Petrov S.V., Homma M. Plasma cleaning of contaminated waters. *Avtomaticheskaya Svarka*, 2012, (6), pp. 58–59. (Rus.)
4. Nikiforov A.S., Kulichenko V.V., Zhykharev M.I. Neutralisation of liquid radioactive wastes. Moscow : Energoatomizdat Publ., 1985, 183 p. (Rus.)
5. Technological and organizational aspects of treatment of radioactive waste. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2005, 220 p. (Rus.)
6. Andryushin I.A., Yudin Yu.A. Review of problems in treatment of radioactive waste and spent nuclear fuel. Saratov: RFNC-VNIIEF Publ., 2010, 119 p. (Rus.)
7. Seida V.A., Tsyvun A.P. Problems in treatment of radioactive wastes at Chornobyl NPP. *Problems of the Chornobyl exclusion zone*, 2012, iss. 10, pp. 40–53.
8. Nigmatulin R.I. Dynamics of multiphase media. Moscow : Nauka Publ., 1987, 1, 459 p. (Rus.)
9. Petrov S.V., Bondarenko S.G., Rubets D.I., Savanchuk O.V., Yanyuk V.A. Modelling of behaviour of an air bubble in the stationary arc discharge field. *East-European Journal of Advanced Technologies*, 2013, (3/5), pp. 73–78. (Rus.)
10. Mikheikin S.V. Cleaning of soil by the hydroseparation method. *Bezopasnost okruzhayushchei Sredy*, 2006, (3), pp. 48–50. (Rus.)

Received September 16, 2013

УДК 546.212:621.35

Бордун І.М., канд. фіз.-мат наук, **Пташник В.В.,** аспірант

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. Князя Романа, 5, 79005 Львів, Україна, e-mail: bordun.igor@gmail.com

Контроль струму як метод визначення глибини електрохімічної активації водних розчинів

Проаналізовано різні методики визначення глибини активації під час електрохімічної обробки водних розчинів. Показано, що під час активації таких розчинів у стаціонарному електролізері спостерігається характерна залежність сили струму від часу. Встановлено, що характер зміни сили струму корелює зі зміною водневого показника рН та електропровідністю продуктів електролізу. Це дозволяє визначити глибину активації за зміною сили струму. *Бібл. 16, рис. 2.*

Ключові слова: електропровідність води, електрохімічна активація, глибина активації.

Електрохімічна активація (ЕХА) водних розчинів є перспективним напрямком вдосконалення існуючих технологій водопідготовки для забезпечення їхньої екологічності та ресурсоощадності, оскільки дозволяє відмовитися від використання хімічних реагентів для зміни властивостей водних розчинів [1]. Різноманітність технологічних застосувань [2, 3] забезпечується унікальним поєднанням окислювальних та відновлювальних, каталітичних та біокаталітичних властивостей ЕХА розчинів з непропорційно малим вмістом діючих речовин. Ще одна особливість активава-

них розчинів полягає у тому, що їхні властивості з часом змінюються, релаксуючи до певного стабільного значення [4, 5]. Метастабільність властивостей вимагає враховувати вихідний стан та часовий проміжок від отримання до використання ЕХА розчинів. Релаксаційні процеси у ЕХА розчинах вже у якійсь мірі вивчені, але контроль за глибиною активації залишається на слабо дослідженому рівні.

Це зумовлено, насамперед, складністю опису процесів, які відбуваються під час ЕХА та невизначеністю механізмів активації водного