

Л.М. Макальский, А.В. Кухно, О.М. Цеханович

# ОБРАБОТКА ВОДЫ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ СОЛЕСОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫМИ МЕТОДАМИ

**Аннотация.** Проанализированы методы очистки воды с применением разрядных явлений, которые обладают наибольшей эффективностью в очистке с малыми потребностями энергии для применяемых очистных технологий. Приведены результаты деструкции неорганических включений в воде с использованием электроразрядных технологий. Представлены результаты воздействия разрядных технологий очистки воды на ионы тяжелых металлов из растворов воды. Показаны принципы создания лавиностримерных разрядов (ЛСР) в сантиметровых промежутках над поверхностью воды при атмосферном давлении. Показано, что в результате комплексного воздействия разрядных явлений, физико-химических воздействующих факторов, излучений на разных частотах ЛСР выявлена деструкция органических и неорганических веществ в примесях воды. Применение разрядных технологий является перспективным направлением развития технологии водоподготовки и обезвреживания промышленных сточных вод. Энергия электрических разрядов изменяет химические характеристики обрабатываемой воды, влияет на ее ионный состав, структуру растворенных органических веществ, на жизнеспособность присутствующих в воде микроорганизмов без дополнительных химических реагентов.

**Ключевые слова:** лавиностримерные разряды, воздействие разрядов на растворы, ионы тяжелых металлов, выделение ионов металлов из растворов воды, осветление коллоидов, горная выработка, фенолы, низкотемпературная плазма.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-23-32

## Введение

Основными загрязняющими факторами окружающей среды при подготовке, проведении горных выработок и даже после горных разработок часто являются загрязненные воды. Обычными загрязнителями вод, которые попадают на поверхность, является их минерализация и образование гидровзвесей. Минерализация воды обычно связана с появлением в ней солей различных металлов, органических и неорганических, щелочных и кислотных соединений. Очистка воды от взвешенных в воде частиц производится их осаждением, фильтрацией через грунтовые и насыпные отложения. Освобождение от растворенных в воде

соединений реализуется химическим путем применения реагентов или путем физических приемов воздействия, среди которых известны термические, электролизные, разрядные методы очистки.

В работе из физических методов рассмотрены разрядные технологии очистки воды. Выбраны методы, которые обладают наибольшей эффективностью в очистке с малыми потребностями энергии для применяемых очистных технологий. Применение разрядных технологий является перспективным направлением развития технологии водоподготовки и обезвреживания промышленных сточных вод. Энергия электрических разрядов изменяет химические характеристи-

ки обрабатываемой воды, влияет на ее ионный состав, структуру растворенных органических веществ, на жизнеспособность присутствующих в воде микроорганизмов без дополнительных химических реагентов.

### **Применение электроразрядных технологий очистки воды**

В работе рассмотрим технологию, связанную с организацией разряда над поверхностью воды, такой прием реализует непосредственное взаимодействие воды с низкотемпературной плазмой. Низкотемпературная плазма газового разряда представляет собой квазинейтральную среду, в которой содержатся как положительно, так и отрицательно заряженные частицы. Для очистки воды такая плазма реализуется в парогазовой среде при давлении от  $10^3$  до  $10^5$  Па, образуя ионизированный газ со степенью ионизации до  $10^{-4}$ , с повышенной концентрацией электронов, положительных и отрицательных ионов, радикалов достаточной для поддержания квазинейтрального состояния [1–3].

Электролитная плазма обычно образуется вследствие развития разряда между двумя металлическими электродами, погруженными в раствор электролита. Условием возникновения электролитной плазмы является неравенство площадей поверхности электродов.

Наряду с электролитным разрядом, для очистки воды применяют тлеющий разряд над поверхностью жидкости. Тлеющий разряд в воздушной среде при пониженном атмосферном давлении широко используется в системах обработки жидких сред, когда он служит источником сильных окислителей O, OH<sup>-</sup> радикалов, пероксида водорода H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, оксидов азота NOx и атомарного водорода H [1, 4].

Плазма благодаря ионизации молекул и атомов при использовании электроразрядных явлений возникает под дей-

ствием ударов электронов во внешнем электрическом поле. Столкновение электронов с молекулами плазмообразующего газа влечет за собой образование новых электронов и положительных ионов.

Вследствие электронных соударений в плазме образуются частицы, обладающие высокой реакционной способностью, происходит возбуждение и диссоциация молекул, их колебательно-вращательное движение. Условием образования активных частиц в этом случае является не тепловая энергия, а энергия электрического поля. Возбужденные частицы взаимодействуют с молекулами, оказавшимися в зоне плазмы и на электродах (одним из электродов используется поверхность воды).

Взаимодействие с молекулами воздушной среды с парами воды, даже при невысокой степени ионизации, приводит к изменению свойств включений, находящихся в воде благодаря появлению химически активных частиц. Чаще всего это связано с неоднородностью плазмы в разряде при наличии электронов и ионов. Средняя энергия электронов в тепловых единицах соответствует «температуре»  $3 \cdot 10^4$ – $1 \cdot 10^5$  К. Тогда как температура нейтральных частиц и ионов (практически всего вещества) только несколько выше комнатной 300–320 К, называют такой разряд разрядом с «низкотемпературной плазмой». При этом реализуется сочетание низкой газовой температуры вещества с высокой химической активностью и дает возможность этому виду плазмы быть перспективным инструментом обработки газов, жидкостей и отдельных материалов [1].

В разряде низкотемпературной плазмы электроны присоединяются к нейтральным молекулам, образуя отрицательные ионы за  $10^{-7}$  с, а если присоединение не происходит, то возникает резонансное возбуждение состояний молекул, что влечет за собой инверсную

заселенность энергетических уровней. Степень неравновесности плазмы возрастает при увеличении разницы скоростей прямых и обратных процессов [1].

Для низкотемпературной плазмы характерно, что ее неравновесность проявляется через отношение к собственному излучению. Она является прозрачной в большей части спектра падающего излучения и отражающей в спектре, который сама излучает. Неравновесная низкотемпературная плазма может сохранять свои параметры в течение более длительного времени, чем время релаксации и тем самым она проявляет свойство стационарности, тем самым в ней проявляются свойства реакционной активности.

В области разряда вблизи поверхности воды происходит частичное ее испарение, разряд приобретает спектр излучения в диапазоне 304–316 нм, что соответствует условиям возбуждения молекул кислорода и диссоциации молекул воды. В разрядном промежутке появляется излучение, характерное для неканцерогенных медицинских ламп УФ-излучения.

Из-за возбуждения и энергетического воздействия образуется атомарный кислород — O, способный образовать молекулу озона — O<sub>3</sub>, гидроксильные группы OH<sup>-</sup> радикалов, которые оказывают большое влияние на загрязнения в воде. Установлено, что время жизни OH<sup>-</sup> радикалов в озono-воздушной смеси составляет 0,1–0,3 мс, радиус диффузии OH<sup>-</sup> радикалов соответствует диаметру разряда и радикалы за время жизни переносятся на расстояние не более 30 мкм (концентрация их при этом снижается более чем в 10 раз). Для переноса в воду радикалы OH<sup>-</sup> должны создаваться в непосредственной близости или на поверхности воды [4].

Среди наиболее часто используемых разрядов для очистки воды выделяется: электролитный (разряд в жидкости), тле-

ющий, коронный, СВЧ-разряд с частотой возбуждения в несколько ГГц, барьерный разряд, лавиностримерный разряд.

Электролитная плазма обычно образуется вследствие развития разряда между двумя металлическими электродами, погруженными в воде. Разряды в воде связаны с образованием дуги в самой жидкости. Дуга способствует появлению излучений, образованию паровой каверны с последующим схлопыванием ее и возникновением кавитации. Этот метод связан с нагревом воды при протекании тока и, следовательно, с существенными затратами электрической энергии.

С помощью тлеющего разряда низкого давления, над поверхностью воды, реализуются методы очистки воды. В этом случае тлеющие разряды реализуются при сравнительно малых токах, поэтому процессы очистки происходят со сравнительно малых расходах электроэнергии, но для системной реализации очистки требуется понижение давления, что требует больших энергозатрат.

Для очистки воды может использоваться барьерный разряд. Барьерный разряд, возникает в газе при атмосферном давлении между электродами разделенными диэлектриком при подаче высоковольтного импульсного напряжения. Он реализуется в виде отдельных стримерных микрозарядов, температура электронов в которых достигает  $(1-3)10^4$  К, а температура газа и диэлектрика не превышает 300–400 К [5–6]. Применение диэлектрического барьера требует предварительной очистки воды и тем не менее он способен загрязняться солевыми отложениями.

Лавиностримерный разряд реализуется в газовом промежутке между электродами, один из которых металлический электрод с малым радиусом кривизны и плоским электродом, который может быть водной поверхностью. Эффективность лавиностримерного разря-

да при реализации низкотемпературной плазмы повышается при использовании импульсного напряжения между электродами с фронтом импульса в пределах наносекунд и длительности до нескольких микросекунд. При этом импульсное напряжение имеет амплитуду, превышающую начальное напряжение разряда, когда в промежутке возникают лавины электронов и формируются стримерные разряды с ионизационными явлениями. Развитие лавиностримерных разрядов продолжается до тех пор, пока мгновенное значение напряжения на электродной системе не достигнет  $U_{\max}$  (напряжения начала разрядных явлений) и при этом время импульса не позволяет образоваться лидерному разряду и при его проводимости замкнуть промежуток искрой. Особенностью лавиностримерного разряда является локальное объемное накопление заряда в объеме промежутка и продолжение разрядных явлений уже после прекращения подачи напряжения на электродную систему и продвижения разряда по разрядному промежутку из объемного заряда.

### **Применение лавиностримерного разряда для очистки воды**

Лавиностримерный разряд (ЛСР) формируется по аналогии с факельным разрядом [8]. В воздухе вблизи электродов с малой кривизной возникает ионизация, сопровождаемая свечением, в промежутке образуются лавины электронов и стримеры. Стримеры обычно распространяются в разрядном промежутке и способны образовывать лидерные разряды.

В малых промежутках пересечение разрядного промежутка лидером приводит к искровому и дуговому разряду. В коротких промежутках формирование лавин и стримеров без перехода в лидерный разряд реализуется с использованием импульсного напряжения малой длительности. Развить объемную зону

ионизации на весь разрядный промежуток удается путем реализации импульсных микросекундных разрядов с наносекундными фронтами нарастания напряжения [1]. ЛСР в воздушной среде за счет столкновений молекул газа с электронами и ионами в электрическом поле обеспечивается их возбуждение, диссоциация и химическое их взаимодействие.

В результате появления избыточных гидроксильных радикалов и перекиси водорода в результате «бомбардировки» поверхности воды ионами и лавинами электронов ЛСР, возможно нарушение устойчивых состояний высокомолекулярных соединений и появление окислительных химических реакций. Поэтому возможно инициация самих реакций и каталитических процессов с загрязняющими компонентами в воде, которые в исходных условиях были невозможны.

Это открывает прикладное значение очистки воды наравне с известными радиобиологическими процессами в радиобиологии, в этом случае энергия квантов излучения слишком малы для разложения воды, но очистка воды от вредных компонентов может быть перспективной в связи с реализацией облучения воды при использовании лавиностримерного разряда.

Это характерно для использования эксимерного лазера когда импульсный радиолиз, за 100 мкс, инициирует быстрые реакции, в условиях переходных термодинамических процессов, когда появляются особые условия энергетического обмена, смешивания компонентов, появления реакций, отличных от медленно меняющихся условий [7–8].

Можно предположить, что использование таких свойств разряда как «бомбардировка» поверхности воды и растворенных компонентов ионами и электронами, воздействие УФ и СВЧ излучений, окисление сильными окислителями, которые

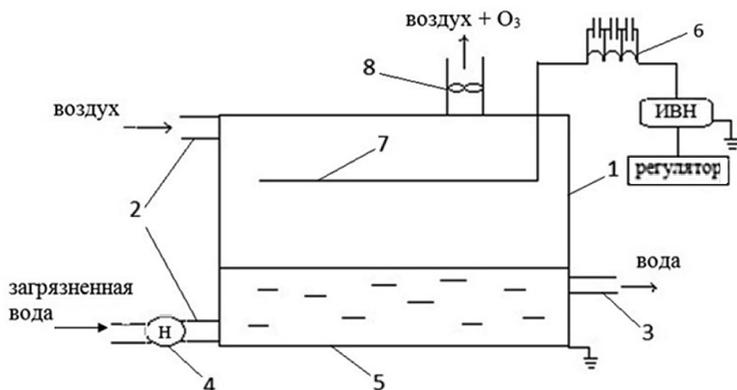


Рис. 1. Схема установки для применения лавиностримерного разряда (ЛСР)  
 Fig. 1. Streamer discharge installation diagram

появляются в разряде, разрушение слабых химических связей, фоторазложение, разрыв бинарных молекул, частичная полимеризация и разрушение органических молекул при их возбуждении и окислении могут сохраняться и для других разрядных процессов над поверхностью раствора.

ЛСР для разложения химических соединений, оказывается эффективным поскольку в нем присутствуют такие излучения как УФ, СВЧ, бомбардировка ионами и электронами (аналогично воздействию альфа, бета-излучениям), в ЛСР образуются свободные радикалы, отдельные нейтральные молекулы, мощные окислители. Следует отметить, что использование ультрафиолета, атомарного кислорода  $O$ , озона  $O_3$ , окислов азота, перекиси водорода  $H_2O_2$ , облучение воды электронами ( $\beta$ -излучение), СВЧ излучением влияют на жизнедеятельность всех известных микроорганизмов, т.к. они не способны вырабатывать устойчивость к перечисленным излучениям и окислителям. Поэтому ЛСР вызывают и деструкцию и дезинфекцию для загрязнений, кроме того, они удаляют неприятные запахи и привкусы воды. Именно эти свойства отмечены при применении низкотемпературной плазмы (теющего разряда) при пониженном

давлении, при добавлении перекиси водорода и каталитических добавок.

Установка с ЛСР представлена на рис. 1: 1 — реактор, 2 — входы для растворов воды и воздуха, 3 — выходные патрубки для очищенной воды, 8 — выходные патрубки для воздуха с озоном. Растворы для очистки воды подаются в реактор с электропроводящим основанием 5. Источник высокого напряжения ИВН через резонансный ограничитель 6 обеспечивает подачу напряжения 40 кВ к электродам с малым радиусом кривизны 7. Благодаря ограничителю на электродах формируются импульсы напряжения  $0,5 \div 1,0$  мкс с наносекундным фронтом.

В разрядном промежутке над поверхностью раствора возникает лавиностримерный разряд. На рис. 2 приведена фотография лавиностримерного разряда при атмосферном давлении между проводами малого диаметра, с одной стороны, и поверхностью раствора, с другой. Разряд занимает весь объем над водным раствором, при межэлектродном расстоянии 4 см и ширине реактора — 5 см.

Объемная форма разряда в промежутке провод — плоскость представляет собой параболические силовые линии, вершины которых расположены на коро-

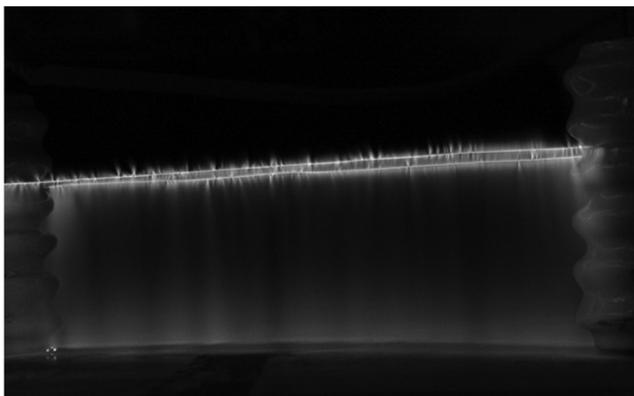


Рис. 2. Лавиностримерный разряд над поверхностью воды  
Fig. 2. Streamer discharge above water surface

нирующем электроде, а ветви стримерных разрядов отклоняются от оси разряда на расстояние, соответствующее межэлектродному расстоянию и по нормали входят в плоскость водной поверхности. Внутри параболы наблюдается периферийная зона фиолетового свечения, а центральная область имеет бледно-голубой цвет с хорошо заметными увеличениями интенсивности свечения у анода и катода.

Важным условием инициации процессов деструкции вредных включений является применение коротких импульсных воздействий, что реализуется в лавиностримерном разряде.

Образующаяся ионизация с появлением стримеров, на всей длине промежутка вызывают появление озона и электромагнитных излучений. Источник электрического питания для формирования лавиностримерного разряда над водными растворами позволяет получать над жидкостью: мягкое ( $\lambda = 0,30\text{--}0,35$  мкм) и жесткое ( $\lambda = 0,23\text{--}0,28$  мкм) ультрафиолетовое излучение, характерное излучение для возбужденных гидроксидов  $\text{OH}^-$ , синглетный кислород, при этом появлялось СВЧ излучение в диапазоне  $0,5\text{--}5$  ГГц,  $\beta$  — излучение (с энергией до  $10$  кэВ). В разрядном промежутке образовывался атомарный кислород (O),

озон ( $\text{O}_3$ ), окислы азота ( $\text{NO}_x$ ). В растворе регистрировали появление пероксида водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ).

Физико-химические факторы, по отдельности очищающие воду, проявляются в лавиностримерных разрядах, поэтому проверяли воздействие АСР на очистку воды от разных примесей и было установлено, что химические реакции в загрязненных водах, проявляют электролитические воздействия, характерные для электролиза, и обеспечивают деионизацию от ионов металлов, выделение их из растворов, тем самым создают обеззараживание воды от тяжелых металлов.

Продемонстрируем как применение лавиностримерных разрядов воздействует на водные включения.

Выделение тяжелых металлов продемонстрировано на примере выделения железа и меди из растворов  $\text{FeCl}_3$  и солей церия Се, с концентрациями  $2$  мг/л. Выделение ионов металлов оценивалось по осадку Fe и Се на электродах, находящихся в растворе.

При увеличении времени воздействия на растворы метилоранжа pH раствора не меняется, а прозрачность повышается за счет выпадению красителя и дисперсных продуктов деструкции. АСР в случае воздействия на метилоранж разрушал группы, отвечающие за окра-

ску (азо-группы). При этом, учитывая сходство метилоранжа с аминокислотами из-за общности структурных особенностей вещества с белками можно считать метилоранж модельной структурой аминокислот и белковых включений. По результатам экспериментов можно считать, что найдена возможность разделять в водной среде аминогруппы и карбоксильные группы путем воздействия на радикалы органических соединений с образованием гидровзвесей с последующим осаждением их.

Приведенная разрядная технология очистки воды подтверждает возможность моделирования очистки воды от органики, коллоидов и красителей. Другим примером воздействия на органические вещества следует выбрать очистку воды от растворенных фенолов. Фенолы являются теми загрязняющими веществами, которые весьма распространены. Это объясняется большим объемом мирового производства и применения, их высокой растворимостью в воде, они

обладают высокой токсичностью даже в малых концентрациях [12–14].

Многие металлы с большим молекулярным весом, а также те, которые влияют на жизнедеятельность живых организмов в воде, образуют тяжелые ионы и проникают внутрь организма. Такие распространенные ионы металлов в воде как железо, медь, цинк, молибден участвуют в биологических процессах, а в определенных количествах являются необходимыми для жизни человека растений и животных. В больших концентрациях и дозах, эти металлы и их соединения могут оказывать вредное воздействие на организм, они способны накапливаться в тканях, вызывая ряд заболеваний. Часть из них, таких как свинец и ртуть, ванадий, кадмий имеют токсичное влияние на организмы даже в малых концентрациях, они определяют токсичность воды. Поэтому ионы тяжелых металлов в воде являются нежелательными включениями и являются ее загрязнителями.

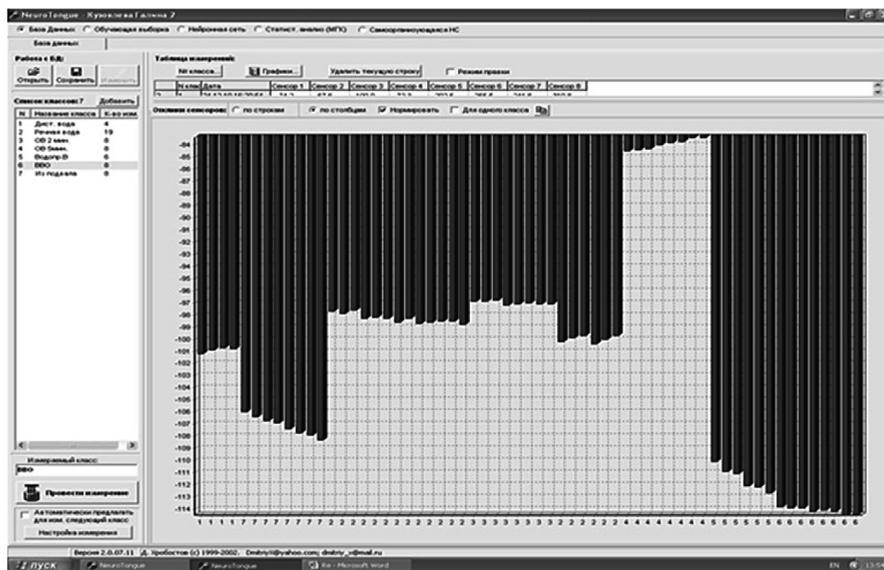


Рис. 3. Изменение содержания ионов свинца в воде разной природы и после воздействия лавиностримерного разряда

Fig. 3. Change in the content of lead ions in water of different nature after treatment by streamer discharge

Очистка от ионов тяжелых металлов обычно проводится путем применения осмоса или электролиза. Как правило, эти методы энергоемки и дорогостоящие. Лавиностримерное воздействие на воду может быть фактором для очистки ее не только от органических и органолептических компонентов но и от тяжелых металлов.

Исследовалось влияние разряда на содержащиеся в воде ионы тяжелых металлов. Рис. 3 демонстрирует содержание ионов свинца  $Pb^{+}$  в воде, выявленное с помощью мультисенсорного анализатора МАП-01 [15].

На диаграмме показано изменение ионов свинца до воздействия лавиностримерного разряда и после него. Наличие ионнообменного потенциала, обусловленное наличием концентрации ионов  $Pb^{+}$  соответствует следующим пробам воды: 1 — дистиллированной воде, 2 — речной воде при отсутствии воздействия разряда; 3 — при воздействии на речную воду разряда в течение 2 мин, 4 — на речную воду в течение 5 мин; 5 — соответствует состоянию водопроводной воды без воздействия разряда, 6 — водопроводной воде при воздействии разряда в течение 2 мин; 7 — демонстрирует содержание свинца в техническом отстойнике без воздействия разряда.

Повышенное содержание ионов свинца в отстойной воде свидетельствует о

высоком содержании ионов в сточных водах для подвальных помещений. Установлено, что разряд уменьшает общее количество свободных ионов свинца.

Исследования взаимодействия растворов с солями нерадиоактивного церия при ЛСР продемонстрировали выделение церия на металлических электродах в реакторе. При воздействии с ЛСР реализуется электролитический процесс осаждения ионов тяжелого металла.

### **Заключение**

В работе проанализированы методы очистки воды с применением разрядных явлений:

- приведены результаты деструкции неорганических включений в воде с использованием электроразрядных технологий;
- представлены результаты воздействия разрядных технологий очистки воды на ионы тяжелых металлов из растворов воды;
- показаны принципы создания лавиностримерных разрядов в сантиметровых промежутках над поверхностью воды при атмосферном давлении;
- показано, что в результате комплексного воздействия разрядных явлений, физико-химических воздействующих факторов, излучений на разных частотах ЛСР выявлена деструкция органических и неорганических веществ в примесях воды.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Смирнов Б. М. Введение в физику плазмы, 2-е изд. — М.: Наука, 1982. — 176 с.
2. Дурибе В. Ч. Удаление ионов железа из водных растворов окислительным методом // Успехи химии и химической технологии. — 2011. — № 5 (121). — С. 58–63.
3. Богма М. В., Османова Н. А., Ерузин А. А. и др. Влияние обработки низкотемпературной плазмой на химический состав и микробиологические показатели лекарственного растительного сырья // Химия растительного сырья. — 2011. — № 1. — С. 137–140.
4. Максимов А. И., Хлюстова А. В., Трошенкова С. В. Влияние тлеющего разряда на кислотность растворов электролитов // Электронная обработка материалов. — 2004. — № 6. — С. 31–35.
5. Chen F. F. Lecture Notes on Principles of plasma processing. — Los Angeles Plenum/Kluwer Publishers, University of California, 2002, — 249 p.

6. *Sunka P.* Generation of chemically active species by electrical discharges in water // *Plasma Sources Science and Technology*. 1999. — Vol. 8. — no 2. — pp. 258–260.
7. *Sekine Y.* Effective utilization of electrical discharges for hydrogen production // *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*. 2008. — Vol. 2. — pp. 72–75.
8. Les Renardieres Group. Positive discharges in long air gaps at Les Renardieres, 1975 Results and conclusions // *Electra*. 1977. no 53. pp. 31–153.
9. *Ефремов А. М., Светцов В. И., Рыбкин В. В.* Вакуумно-плазменные процессы и технологии. — Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2006. — 260 с.
10. *Полак Л. С.* Очерки физики и химии низкотемпературной плазмы. — М.: Наука, 1971. — 436 с.
11. *Васильев А. И., Василяк Л. М., Дриго А. Л. и др.* Исследование «Advanced Oxidation Process» на примере раствора метилоранжа в воде / *Материалы V Всероссийской конференции «Физическая электроника»*. — Махачкала, ИПЦ ДГУ, 2008. — С. 61–64.
12. *Кондратьева О. Е., Королев И. В., Кухно А. В., Макальский Л. М., Цеханович О. М.* Очистка воды от загрязняющих веществ путем использования лавиностримерных разрядов // *Известия Самарского НЦ РАН*. — 2015. — т. 14. — № 5(2) — С. 673–677.
13. *Кухно А. В., Макальский Л. М., Цеханович О. М.* Очистка воды от фенольных загрязнений лавиностримерными разрядами / *Биоэкологическое краеведение: мировые, российские и региональные проблемы: материалы 5-й Международной научно-практической конференции*. 14 декабря 2016 г., г. Самара, РФ. Отв. ред. С.И. Павлов. — Самара: СГСПУ, 2016. — С. 209–215.
14. *Кухно А. В., Макальский Л. М., Цеханович О. М.* Очистка минерализованных вод подземной откочки // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2016. — № 11. — С. 266–276.
15. *Житков А. Н.* Патент № 2269124 — Способ идентификации жидких и воздушных сред, 2000. **ПАТ**

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Макальский Леонид Михайлович*<sup>1</sup> — кандидат технических наук, доцент,  
*Кухно Андрей Валентинович*<sup>1</sup> — аспирант,  
*Цеханович Ольга Михайловна* — кандидат технических наук,  
доцент, e-mail: olgagzhel@mail.ru,  
Гжельский государственный университет,  
<sup>1</sup> НИУ «МЭИ».

---

ISSN 0236-1493. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018. No. 7, pp. 23–32.

#### Mine water treatment by electrical discharge to reduce salinity

*Makal'skiy L.M.*<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,  
*Kukhno A.V.*<sup>1</sup>, Graduate Student,  
*Tsekhanovich O.M.*, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,  
Gzhel state University, Moscow region, Ramensky district, Russia,  
<sup>1</sup> National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,  
111250, Moscow, Russia.

**Abstract.** In preparation, development and production mining, one of the pollutants to the environment is contaminated water. Conventional contamination of water flows to ground surface is mineralization and solid suspension. Mineralization is usually connected with salts of different metals, organic and inorganic, alkali and acid compounds. Suspended solids are removed from water by precipitation, or filtration through soil and embankments. Purification of dissolved compounds is carried out by chemical agents or by physical treatment using, inter alia, the known methods of thermal action, electrolysis and discharge. This article gives a review of water treatment by discharge as these methods exhibit the highest efficiency of water purification at low energy consumption with the current wastewater technologies. The results of destruction of inorganic impurities in water by electric discharge are reported. The effect

of water treatment by electrical discharge aimed to remove ions of heavy metals is described. The principles of creation of streamer discharges in centimeter intervals above water surface under the atmospheric pressure are presented. It is shown that the integrated treatment by electrical discharge, physicochemical factors and varied streamer discharge frequency radiation results in destruction of organic and inorganic impurities in water. The application of the methods based on electrical discharge is a promising line of development in the technology of wastewater treatment and neutralization. Energy of electrical discharge changes chemical characteristics of water under treatment, influences content of ions and structure of dissolved organic substances in water and affects vital capacity of microorganisms without addition of chemical agents.

**Key words:** streamer discharge, influence of discharge on solution, heavy metal ions, removal of metal ions from water solutions, clarification of colloids, underground excavation, phenols, low-temperature plasma.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-23-32

## REFERENCES

1. Smirnov B. M. *Vvedenie v fiziku plazmy*, 2-e izd. [Introduction to plasma physics, 2nd edition], Moscow, Nauka, 1982, 176 p.
2. Duribe V. Ch. Udalenie ionov zheleza iz vodnykh rastvorov oksiditel'nym metodom [Removing iron ions from aqueous solutions of oxidizing method], *Uspekhi khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2011, no 5 (121), pp. 58–63. [In Russ].
3. Bogma M. V., Osmanova N. A., Eruzin A. A. Vliyanie obrabotki nizkotemperaturnoy plazmoy na khimicheskiy sostav i mikrobiologicheskie pokazateli lekarstvennogo rastitel'nogo syr'ya [Influence of low temperature plasma processing on chemical composition and microbiological indicators of medicinal vegetative raw material], *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2011, no 1, pp. 137–140. [In Russ].
4. Maksimov A. I., Khlyustova A. V., Troshenkova S. V. Vliyanie tleyushchego razryada na kislotnost' rastvorov elektrolitov [Glow effect on acidity of solutions of electrolytes], *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2004, no 6, pp. 31–35. [In Russ].
5. Chen F. F. *Lecture Notes on Principles of plasma processing*. Los Angeles Plenum. Kluwer Publishers, University of California, 2002, 249 p.
6. Sunka P. Generation of chemically active species by electrical discharges in water. *Plasma Sources Science and Technology*. 1999. Vol. 8. no 2. pp. 258–260.
7. Sekine Y. Effective utilization of electrical discharges for hydrogen production. *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*. 2008. Vol. 2. pp. 72–75.
8. Les Renardieres Group. Positive discharges in long air gaps at Les Renardieres, 1975 Results and conclusions. *Electra*. 1977. no 53. pp. 31–153.
9. Efremov A. M., Svetsov V. I., Rybkin V. V. *Vakuumno-plazmennye protsessy i tekhnologii* [Vacuum plasma process and technology], Ivanovo, 2006, 260 p.
10. Polak L. S. *Ocherki fiziki i khimii nizkotemperaturnoy plazmy* [Essays on physics and chemistry of low-temperature plasma], Moscow, Nauka, 1971, 436 p.
11. Vasil'ev A. I., Vasilyak L. M., Drigo A. L. Issledovanie «Advanced Oxidation Process» na primere rastvora metiloranzha v vode [Study on Process Compounded Advanced example solution metiloranzha in water], *Materialy V Vserossiyskoy konferentsii «Fizicheskaya elektronika»*. Makhachkala, IPTs DGU, 2008, pp. 61–64. [In Russ].
12. Kondrat'eva O. E., Korolev I. V., Kukhno A. V., Makal'skiy L. M., Tsekhanovich O. M. Ochistka vody ot zagryaznyayushchikh veshchestv putem ispol'zovaniya lavinostrimernykh razryadov [Water purification from pollutants through the use of lavinostrimernykh bits]. *Izvestiya Samarskogo NTs RAN*. 2015, vol. 14, no 5(2), pp. 673–677. [In Russ].
13. Kukhno A. V., Makal'skiy L. M., Tsekhanovich O. M. Ochistka vody ot fenol'nykh zagryazneniy lavinostrimernymi razryadami [Water purification from phenolic contaminants lavinostrimernymi bits]. *Bioekologicheskoe kraevedenie: mirovye, rossiyskie i regional'nye problemy: materialy 5-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. December 14, 2016, Samara, Russia. Samara, SGSPU, 2016, pp. 209–215. [In Russ].
14. Kukhno A. V., Makal'skiy L. M., Tsekhanovich O. M. Ochistka mineralizovannykh vod podzemnoy otkachki [Cleaning underground saline water pumping out]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 11, pp. 266–276. [In Russ].
15. Zhitkov A. N. *Patent RU 2269124*, 2000.