

03;12

Пролонгированная микробная устойчивость воды, обработанной импульсными электрическими разрядами

© В.А. Коликов,¹ В.Е. Курочкин,² Л.К. Панина,³ А.Ф. Рутберг,¹ Ф.Г. Рутберг,¹ В.Н. Снетов,¹ А.Ю. Стогов¹

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,
191186 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: rutberg@iperas.spb.ru

² Институт аналитического приборостроения РАН,
198103 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: kuroch@ianin.spb.ru

³ Институт физиологии им. А.А. Ухтомского Санкт-Петербургского государственного университета,
199034 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: lkpanina@narod.ru

(Поступило в Редакцию 26 июня 2006 г.)

Представлены результаты исследования основных характеристик импульсных электрических разрядов в воде, таких как разрядный ток, падение напряжения на разрядном промежутке, температура столба разряда, удельная проводимость плазмы разряда, а также возникающих в процессе электрического разряда факторов: волн сжатия, ультрафиолетового излучения. Рассмотрены физико-химические свойства воды, обработанной с помощью импульсных электрических разрядов, во взаимосвязи с ее воздействием на микроорганизмы, дано объяснение механизма возникновения пролонгированной микробной устойчивости воды — способности воды в течение многих месяцев после обработки импульсными электрическими разрядами сохранять поражающую способность в отношении практически всех известных патогенных микроорганизмов и оппортунистических человеку грибных культур.

PACS: 52.80.Wg, 77.22.-d

Введение

Исследования поражающего действия электрического поля и различного рода электрических разрядов на находящиеся в воде микроорганизмы проводятся в течение более тридцати лет [1–9], однако по настоящее время некоторые принципиальные нерешенные вопросы в этой области, например, выяснение механизмов возникновения пролонгированной микробной устойчивости воды (ПМУВ) — способности воды в течение многих месяцев после обработки импульсными электрическими разрядами (ИЭР) сохранять поражающую способность в отношении практически всех известных патогенных микроорганизмов и оппортунистических человеку грибных культур — вызывают интерес исследователей к этой проблеме.

Результаты исследований последних десятилетий в области медицины указывают на то, что резкий рост онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний является следствием обеззараживания воды хлорированием [10]. Обнаружено, что в питьевой воде, обеззараженной хлорированием, присутствуют устойчивые частицы (макрорадикалы), которые в течение длительного времени поддерживают протекание свободнорадикальных цепных реакций [11]. Установлено, что данные микро-радикалы представляют собой то патогенное начало, которое провоцирует возникновение и развитие этих и иных тяжелых заболеваний [12,13]. Эти обстоятельства побуждают к поиску альтернативных, более безопасных для человека, методов обеззараживания воды.

ИЭР в воде уже сейчас могут быть использованы для обеззараживания стоков больниц и промышленных предприятий, а при наличии экспериментальных данных об отсутствии их негативного воздействия на организм человека предполагается их использование в медицине, фармацевтической и пищевой промышленности [14].

Общая бактерицидность, создаваемая ИЭР в воде, обусловлена двумя видами факторов, действующими:

— в момент разряда: волны сжатия, ультрафиолетовое излучение и гидратированные электроны;

— преимущественно после разрядного импульса: активные радикалы типа ОН, перекись водорода и продукты эрозии материала электродов.

Поскольку время существования гидратированных электронов составляет ~ 0.5 ns, а радикалов и перекиси водорода не более нескольких суток, то рассматривать их в качестве факторов, вызывающих ПМУВ, которая, как было сказано, сохраняется в течение нескольких месяцев, нет никаких оснований. Следовательно, исключив вышеназванные факторы, можно предположить, что причиной возникновения ПМУВ являются продукты эрозии материала электродов.

Экспериментальная часть

Блок-схема установки для обеззараживания воды представлена на рис. 1. Электроразрядная обработка воды осуществляется в разрядной камере (1), изготовленной из диэлектрического материала, с помощью генератора электрических импульсов (2). Установка рассчитана

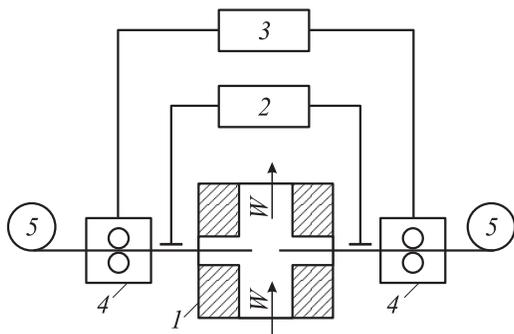


Рис. 1. Блок-схема установки.

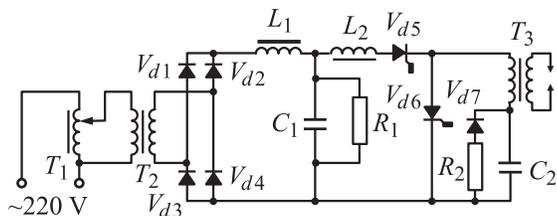


Рис. 2.

на непрерывную автономную работу в течение времени, обусловленного запасом расходуемого электродного материала — проволоки в катушке (5), — т.е. до нескольких месяцев. Непрерывность работы установки обеспечивается системой контроля и управления (3) и устройствами подачи (4) электродного материала (проволоки), которые автоматически поддерживают необходимое межэлектродное расстояние при изменении проводимости обрабатываемой воды (W) при увеличении межэлектродного промежутка, обусловленного эрозией электродов.

Результаты исследований взаимосвязи параметров ИЭР с их собственным обеззараживающим действием, а также физико-химическими и бактерицидными свойствами обработанной воды указывают на то, что оптимальными с точки зрения практической реализации в установках для обеззараживания воды с производительностью от 1 до 15 л/мин являются ИЭР длительностью 1–20 μ s с энергией в импульсе ~ 1 J, со скоростью нарастания тока 10^7 – 10^9 A/s и частотой следования импульсов 100–500 Hz. Предпочтительным типом электродной системы для установок, предназначенных для длительной и непрерывной эксплуатации, является „двухострийная“ схема при межэлектродном промежутке ≤ 10 mm, диаметре водопропускного канала разрядной камеры 10–15 mm и диаметре электродов ~ 1 mm.

Источник питания установки — генератор электрических импульсов (рис. 2), позволяющий обрабатывать водные растворы и дисперсии с удельным сопротивлением не ниже $500 \Omega \cdot \text{m}$. Генератор импульсов работает следующим образом: напряжение сети (220 V, 50 Hz) через автотрансформаторы T_1 и T_2 (220/600 V) подается

на выпрямитель V_{d1} – V_{d4} и фильтр C_1 , L_1 . Поскольку емкость конденсатора $C_1 \gg C_2$, а в цепь зарядки конденсатора C_2 включен дроссель L_2 , то при включении тиристора V_{d5} конденсатор C_2 заряжается до напряжения, превышающего напряжение на конденсаторе C_1 . После включения тиристора V_{d6} конденсатор C_2 разряжается на первичную обмотку высоковольтного импульсного трансформатора T_3 , со вторичной обмотки которого повышенное напряжение прикладывается к разрядному промежутку, вызывая его пробой и образование канала разряда.

Результаты и их обсуждение

Типичные осциллограммы напряжения и тока разрядного импульса, получаемого с помощью одного из генераторов импульсов, представлены на рис. 3. Значения предпробойного напряжения и падения напряжения на дуге относятся в среднем как 100 : 1, поэтому для измерения падения напряжения на дуге применялась схема, ограничивающая напряжение на низковольтном плече делителя напряжения. На рис. 3,а представлены осциллограммы тока и напряжения, полученные без ограничения напряжения (1–10 A/div, U — 10 kV/div, время — 5 μ s/div), а на рис. 3,б — с ограничением напряжения (1–10 A/div, U — 400 kV/div, время — 5 μ s/div).

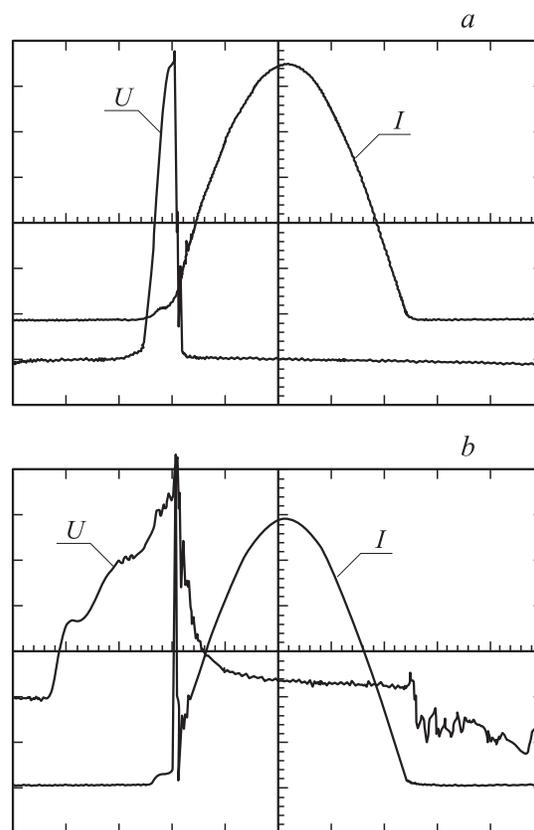


Рис. 3.

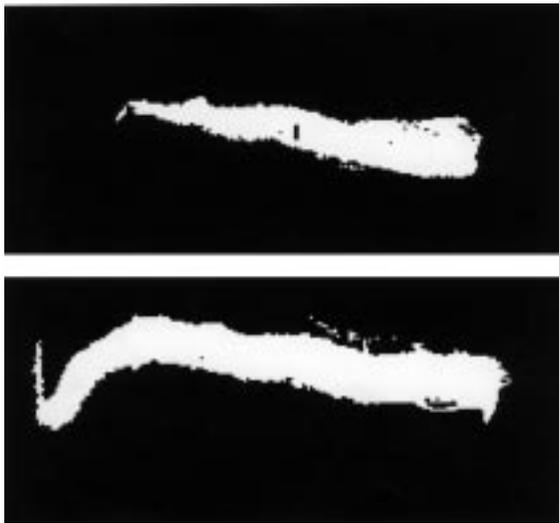


Рис. 4.

Моменту пробоя межэлектродного промежутка предшествует предпробойная стадия, в течение которой происходит рост напряжения на разрядном промежутке до значения, близкого к напряжению холостого хода (65 kV) и следующая за ним временная задержка (1–5 μ s), величина которой определяется как физико-химическими свойствами обрабатываемой воды, так и структурой поверхности электродов. В течение предпробойной стадии ток нарастает до 4 А, что соответствует в данном случае сопротивлению водяного промежутка 16 k Ω . С момента пробоя и начала формирования канала разряда за время $\sim 10 \mu$ s ток нарастает до максимума ~ 60 А, при этом форма импульса тока близка к синусоидальной, падение напряжения на промежутке экспоненциально убывает с ~ 1 kV до 80 V (при средней величине 300 V), что соответствует среднему за процесс сопротивлению канала разряда $\sim 8 \Omega$. Электрическая энергия, выделившаяся за время импульса, составляет ~ 0.25 J, пиковая мощность разряда $\sim 10^4$ VA.

Фотографии канала разряда длиной 13 mm, полученные с помощью высокоскоростной съемочной камеры ЖЛВ-2, через 1.7 и 5.1 μ s после начала пробоя представлены на рис. 4. Используя полученные фотографии канала разряда и ВАХ, можно оценить значение электропроводности плазмы разряда для момента времени вблизи максимума тока. При диаметре канала разряда ~ 1.5 mm и сопротивлении канала разряда $\sim 8 \Omega$ удельная электропроводность составляет ~ 700 S/m.

Одним из факторов поражающего действия самого разряда на бактерии являются волны сжатия, возникающие на стадии расширения канала разряда. Измерение импульсного давления на стенке разрядной камеры и теневая фоторегистрация процесса расширения канала разряда с помощью высокоскоростной цифровой съемочной камеры, выполненные для разрядов с одинаковой энергией в импульсе (~ 0.4 J), но различающихся длительностью, т. е. мощностью, показали, что возрастание мощности разряда приводит к пропорциональному

увеличению амплитуды импульсного давления. Так, для разряда длительностью $\tau = 20 \mu$ s, $dI/dt = 2 \cdot 10^6$ A/s амплитуда волны сжатия составляет ~ 0.5 МПа (рис. 5, a), а при $\tau = 1 \mu$ s, $dI/dt = 2 \cdot 10^9$ A/s — ~ 4 МПа (рис. 5, b).

Исследование спектральных характеристик разряда в воде проводилось для определения температуры канала разряда. Регистрация спектров осуществлялась с помощью дифракционного цифрового спектрографа на электродах из сплава серебра с медью, электротехнической меди и низкоуглеродной стали при амплитуде тока ~ 60 А, среднем падении напряжения на дуге ~ 300 V, длительности импульса $\sim 20 \mu$ s.

На рис. 6 представлен спектр излучения разряда между электродами, изготовленными из электротехнической меди.

Температура канала разряда, определенная на основании полученной спектрограммы методом сравнения относительных интенсивностей излучения в линиях, составляет $\sim 10^4$ К. При данной температуре канал раз-

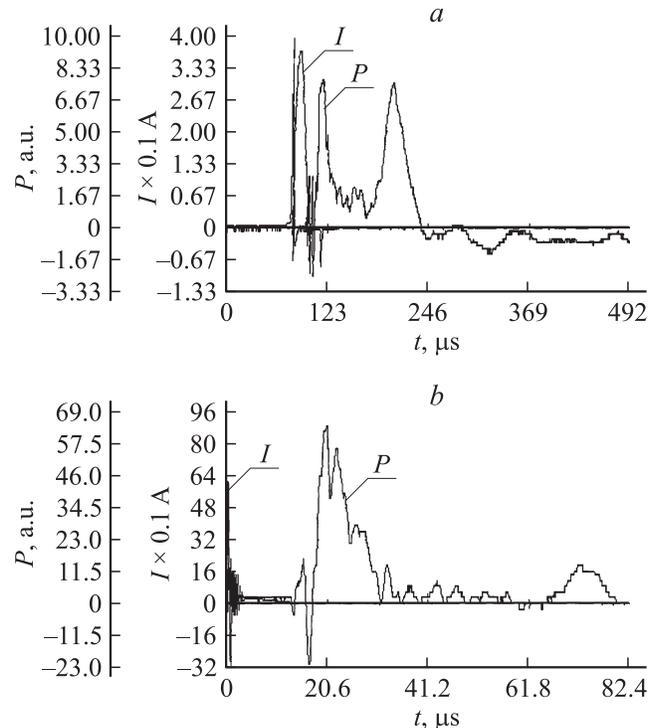


Рис. 5.

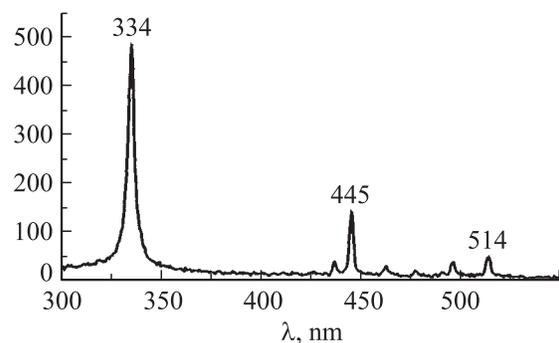


Рис. 6.

ряда является мощным источником ультрафиолетового излучения со значительной долей излучаемой энергии в диапазоне длин волн 200–300 nm. Излучение в этом участке спектра оказывает эффективное поражающее действие на микробы [15], а поглощенное водой вызывает реакцию фотоллиза — генерацию в воде перекиси водорода, атомарного кислорода, озона и активных радикалов OH, которые также оказывают поражающее действие на бактерии [16–18].

Эрозия электродов и наночастицы

Как предполагалось в [19], возникновение ПМУВ обусловлено присутствием в обработанной воде продуктов эрозии материала электродов. Для подтверждения или опровержения данного предположения были проведены углубленные исследования физических и химических свойств обработанной воды во взаимосвязи с ее бактерицидным действием в отношении широкого круга микроорганизмов, включая споры микроскопических грибов.

В начальной стадии исследований для обработки воды использовались электроды, изготовленные из различных металлов и их сплавов. Одним из результатов проведенных работ является диаграмма величин удельной эрозии использованных материалов (рис. 7). Значение удельной эрозии η определялось при частоте следования разрядных импульсов 50 Hz, исследуемым электродом являлся цилиндрический анод диаметром 10 mm.

После того как была установлена взаимосвязь между типом металла электродов и степенью бактерицидности обработанной воды, исследования проводились с использованием трех металлов: серебра, меди и железа (или их сплавов, с преимущественным содержанием указанных металлов). Эта взаимосвязь основана на различной степени токсичности ионов металлов, поглощаемых микроорганизмами, которые согласно работе [20], расположены следующим образом: Ag > Cu > Cd, Zn, Pb > Mn, Fe > Mg, Ca.

Первоочередная задача в цикле исследования физико-химических свойств обработанной с помощью ИЭР воды состояла в экспериментальном подтверждении того, что в результате эрозии материала электродов в воду

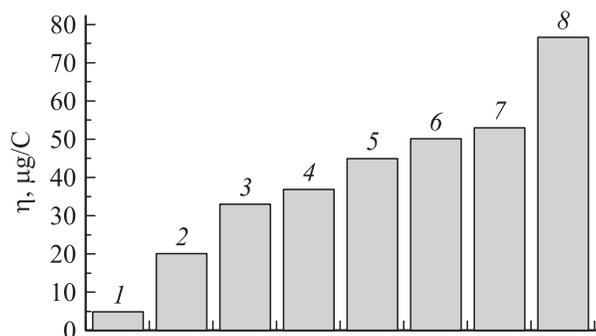


Рис. 7. Удельная эрозия материала электродов: 1 — W + Cu; 2 — Cr₃C₂ + Cu; 3 — Ag + Cu; 4 — Fe; 5 — Mo + W + Cu; 6 — W + Ni + Fe; 7 — Cu; 8 — W + Ni + Cu.

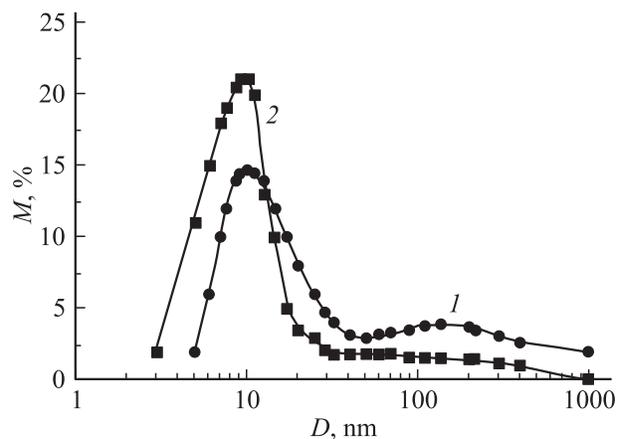


Рис. 8.

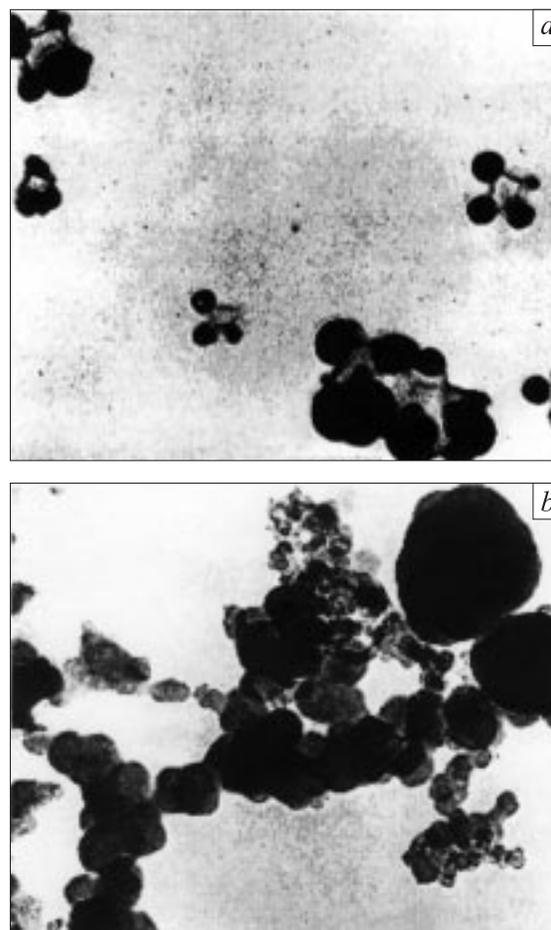


Рис. 9.

поступают как свободные ионы, так и частицы металла электродов. Для этой цели использовались методы диализа, мембранной фильтрации и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (MS-ICP).

Далее при помощи анализатора размеров субмикронных частиц „Coulter N4“ были получены функции распределения частиц металла электродов по размерам (D)

при вложенной удельной энергии 5 (кривая 1) и 10 J/ml (кривая 2) (рис. 8). Из графика видно, что частицы имеют размер от ~ 5 до 100 nm, а максимум функции распределения приходится на частицы размером около 10 nm (в дальнейшем наночастицы), при этом доля наночастиц возрастает с увеличением уровня вложенной энергии.

При помощи электронного микроскопа были сделаны фотоснимки наночастиц серебра и меди, которые позволили определить форму наночастиц и структуру образующихся кластеров (рис. 9, *a* и *b*, масштаб $2 \cdot 10^5 : 1$).

Исследования воды, обработанной электрическими разрядами между медными электродами, методами диализа, эксклюзивной жидкостной хроматографии, электронного парамагнитного резонанса и спектроскопии в ультрафиолетовой и видимой областях спектра, позволили установить, что материалом наночастиц являются оксиды Cu_2O и CuO , находящиеся в динамическом концентрационном равновесии с одно- и двузарядными ионами меди Cu^+ и Cu^{2+} , что присуще коллоидным растворам [21]. В обработанной деионизированной воде при величине вложенной энергии 5 J/ml и $\text{pH} = 5.8-6.3$ отношение массы ионов меди к массе наночастиц составляет 1 : 5. Было установлено также, что подкисление обработанной воды соляной кислотой (HCl) до $\text{pH} = 2.5$ приводит к полному растворению наночастиц и переходу их в ионную форму.

Зависимости массовых концентраций (M_{st}) наночастиц серебра (кривая 1), меди (кривая 2) и железа (кривая 3) в обработанной воде от величины вложенной в разряд удельной энергии (рис. 10) были получены с помощью хроматографического метода (с учетом калибровки по CuCl при $\text{pH} = 2.5$), использовалось отношение массы ионов к массе наночастиц.

Методом высокоэффективного капиллярного электрофореза было установлено, что наночастицы оксидов меди обладают положительным электрическим зарядом.

Бактерицидность воды, обработанной ИЭР

Зависимость обеззараживающей способности воды в отношении бактерий *E. coli*, обработанной с помощью серебряных (кривая 1), медных (кривая 2) и железных (кривая 3) электродов, определяемая как $\lg N_k/N_0$ (где N_0 — начальная концентрация бактерий в воде, N_k — конечная концентрация жизнеспособных бактерий), от удельной вложенной в разряд энергии при времени экспозиции 24 h представлена на рис. 11. Как видно из графика, эффективность обеззараживания пропорциональна вложенной электрической энергии: тем выше, чем более токсичен ион металла электродов по отношению к микроорганизмам. Характер представленной зависимости сохраняется также в отношении бактерий *Klebsiella pneumoniae*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhimurium*, *Serratia marsecens*, *Citrobacter freundii*, *Bacillus subtilis* и спор

микроскопических грибов *Candida albicans*, *Ulocladium chartarum*, *Phaeococcomyces chersonesos*.

На рис. 12, *a, b* представлены зависимости отношения конечной концентрации N жизнеспособных бактерий *E. coli* к начальной N_0 , равной 10^6 ml^{-1} , полученные на установках с одной и четырьмя разрядными камерами, соединенными последовательно по движению зараженной бактериями воды. Как видно из графиков, отношение N/N_0 при сравниваемой величине суммарной вложенной энергии 2.5 J/ml уменьшается с $3 \cdot 10^{-3} \text{ ml}^{-1}$ при числе разрядных камер, равном единице, до 10^{-4} ml^{-1} при числе разрядных камер, равном четырем, что соответствует трехкратному увеличению эффективности поражения бактерий.

Поскольку массовая концентрация наночастиц (рис. 10) и обеззараживающая способность обработанной воды пропорциональны удельной вложенной в разряд энергии (рис. 11), можно утверждать, что между бактерицидностью и массовой концентрацией наночастиц в воде существует прямая зависимость.

Представленные выше данные позволяют рассматривать обработанную воду как некий бактерицидный агент, при добавлении которого в зараженную микробами воду происходит их обеззараживание. В этой

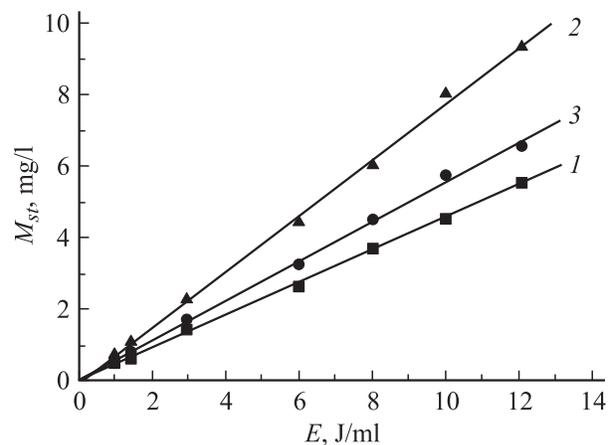


Рис. 10.

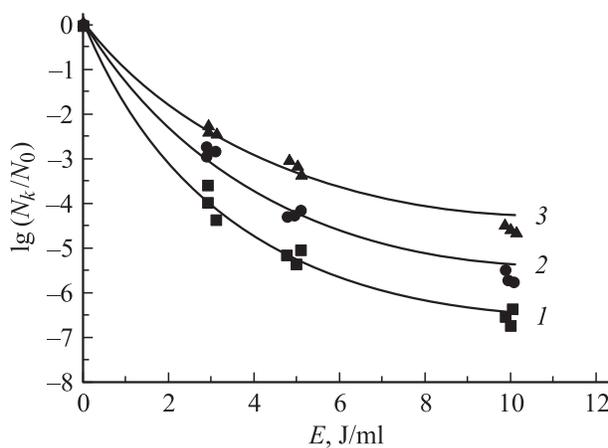


Рис. 11.

связи требовалось определить зависимость обеззараживающей способности обработанной воды при ее добавлении в подлежащую обеззараживанию воду, от степени разбавления. График такой зависимости, где конечная концентрация (C_F) бактерий *E. coli* является функцией степени разбавления обработанной воды (d) исходной, при уровне вложенной энергии 10 J/ml , начальной концентрации бактерий $8 \cdot 10^3 \text{ ml}^{-1}$ и времени экспозиции 24 h, представлен на рис. 13.

Зависимости отношения конечной N_k и начальной N_0 концентраций спор *U. chartarum*, помещенных в воду до начала ее обработки с помощью титановых (кривая 1), железных (кривая 2) и серебряных (кривая 3) электродов и при последующем их нахождении в обработанной воде, от времени экспозиции, при уровне вложенной в разряд энергии 10 J/ml и начальной концентрации спор 10^3 ml^{-1} , представлены на рис. 14. Из графика видно, что зависимость имеет экспоненциальный характер, и в зависимости от рода металла за время от 15 min до 4 h гибнет до 100% спор.

Зависимости отношения конечной N_k и начальной N_0 концентраций бактерий *E. coli* в воде, обработанной с помощью медных электродов, при уровне вложенной энергии 10 J/ml и начальных концентрациях бактерий $4 \cdot 10^3$ (кривая 1) и $5 \cdot 10^6 \text{ ml}^{-1}$ (кривая 2), представлены

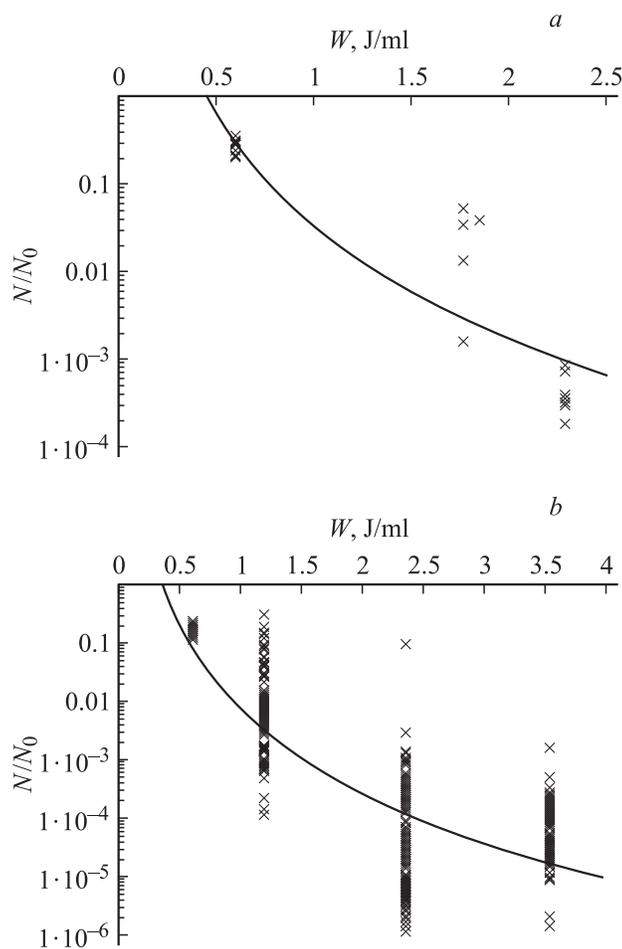


Рис. 12.

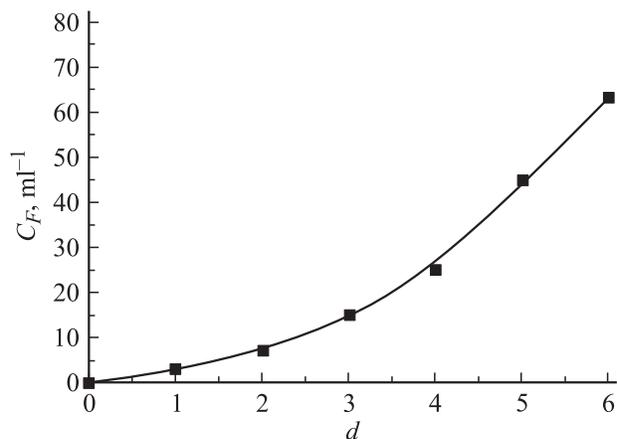


Рис. 13.

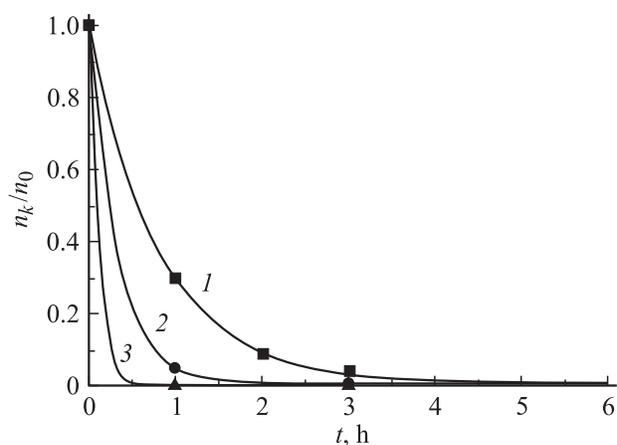


Рис. 14.

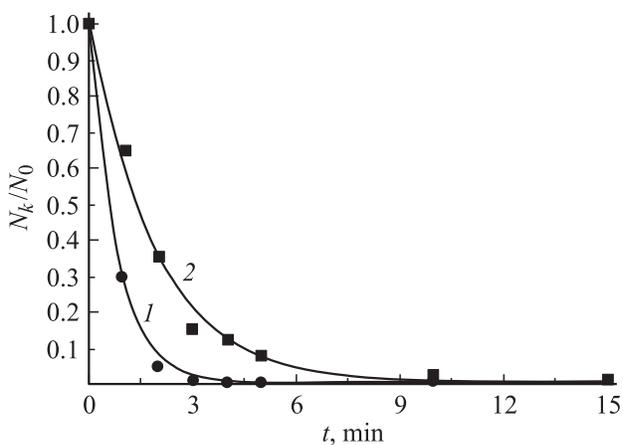


Рис. 15.

на рис. 15. Из графика видно, что зависимости также имеют экспоненциальный характер, а за время 5 min в зависимости от уровня начальной концентрации гибнет от 90 до 100% бактерий.

Механизм пролонгированной микробной устойчивости воды

Для выяснения роли наночастиц в ПМУВ были продолжены опыты по определению степени ингибирования роста микроскопических грибов *U. chartarum*, начатые в [22,23], в двух модификациях одной и той же обработанной ИЭР воды: содержащей после удаления наночастиц только ионы; содержащей ионы и наночастицы. При обработке воды использовались электроды из серебра, меди и железа, величина удельной вложенной энергии равнялась 1,5, 3, 6, 8 и 12 J/ml.

Зависимости разностей конечных концентраций N_i жизнеспособных микроорганизмов после инкубации в течение 10 суток в воде, содержащей только ионы и концентраций жизнеспособных микроорганизмов N_{i+n} , инкубированных в воде, содержащей ионы и наночастицы, при начальной концентрации микроорганизмов, равной 10^3 ml^{-1} , при последующем посеве суспензий на агаризованную среду Чапека, представлены на рис. 16 (кривая 1 — Fe, 2 — Cu, 3 — Ag). Из графика следует, что более эффективное обеззараживание происходит, когда в воде помимо ионов присутствуют наночастицы, причем это в наибольшей степени проявляется у железа как у металла с наименьшей степенью токсичности ионов. Здесь в наибольшей степени проявляется действие собственно наночастиц. Кроме того, это различие уменьшается по мере возрастания уровня вложенной энергии, т. е. с возрастанием концентрации ионов.

Как было отмечено в работе [24], механизм поражающего воздействия наночастиц на бактерии включает в себя в том числе проникновение наночастиц внутрь клетки. С помощью электронной микроскопии нами было установлено, что, по крайней мере в первые часы пребывания бактерий в обработанной воде, происходит налипание наночастиц и их скопления — кластеров — к поверхности бактерий, при этом нет никаких оснований предполагать, что наночастицы, тем более кластеры, проникают внутрь бактерий (рис. 17).

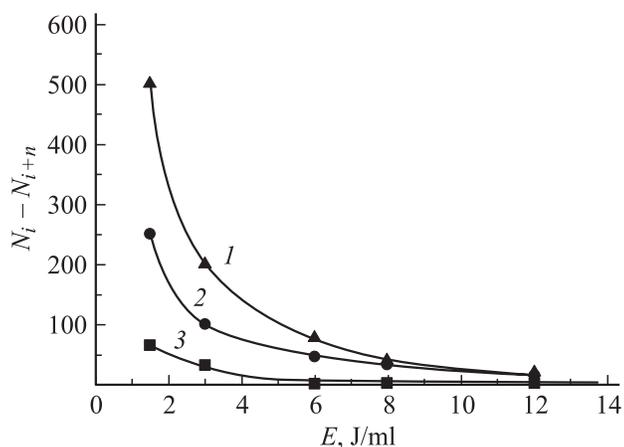


Рис. 16. Ингибирование роста микроскопических грибов *U. chartarum*.

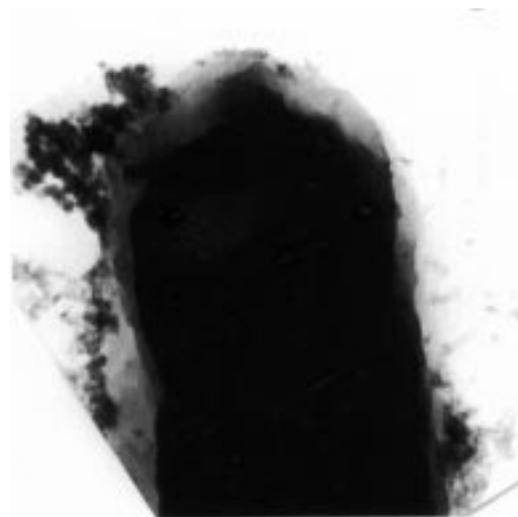


Рис. 17. Наночастицы Cu на стенке бактерии *E. coli* (масштаб $10^5 : 1$).

Наиболее вероятно, что наночастицы и кластеры, являясь источниками ионов, создают вокруг бактерии область постоянно поддерживаемой концентрации, что и обеспечивает эффективное поражение бактерии.

Полученные зависимости, связывающие ПМУВ с параметрами ИЭР и металлом электродов, дают основу для создания подобных водных структур с заданными свойствами. Фактически получаемая при обработке электрическими разрядами вода представляет собой структуру с „интеллектуальными“ динамическими свойствами, в которой наночастицы обеспечивают и поддерживают поражающее действие ионов металла на микроорганизмы в режиме с обратной связью.

Заключение

Во время импульсных электрических разрядов в воде под действием волн сжатия, ультрафиолетового излучения, перекиси водорода, озона, атомарного кислорода, активных радикалов OH и гидратированных электронов происходит гибель находящихся в ней бактерий.

Импульсные электрические разряды вызывают эрозию материала электродов, за счет которой в воде образуются оксидные частицы металла электродов. Максимум функции распределения частиц по размерам приходится на 10 нм (наночастицы). Наночастицы, растворяясь в воде, эмитируют ионы. Между наночастицами и ионами в течение длительного времени поддерживается концентрационное равновесие.

При одинаковой концентрации ионов бактерицидность воды, содержащей ионы и наночастицы выше, чем у воды, содержащей только ионы. Наивысшей бактерицидностью обладает вода, обработанная с помощью серебряных электродов.

Таким образом, наиболее вероятным механизмом пролонгированной микробной устойчивости воды является поражающее действие ионов на бактерии. Долгоживущими источниками ионов являются наночастицы, образующиеся в процессе эрозии электродов, при этом „потенциал“ микробной устойчивости воды определяется начальной концентрацией наночастиц.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 05-02-16033 и 05-08-01125.

Список литературы

- [1] *Edebo L., Selin I.* // J. of General Microbiology. 1968. Vol. 50. P. 253–259.
- [2] *Жук Е.Г.* // ЖМЭИ. 1971. Т. 48. № 1. С. 99–103.
- [3] *Бретон Р.А., Руденко Л.А., Урусов А.Ф.* Электронная обработка материалов. 1971. С. 79–81.
- [4] *Кульский Л.А., Савлук О.С., Дейнега Е.Ю.* Влияние электрического поля на процессы обеззараживания воды. Киев: Наук. думка, 1980. 125 с.
- [5] *Goriachev V.L., Bratsev A.N., Feduikovich V.N., Rutberg Ph.G.* et al. USA Patent Number 05464513, patent date 1995.11.07.
- [6] *Schoenbach K.H., Peterkin F.E., Kldew R.W., and Beebe S.J.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 1997. Vol. 25. N 2. P. 284–292.
- [7] *Горячев В.Л., Рутберг Ф.Г., Федюкович В.Н.* // Изв. РАН. Энергетика. 1998. № 1. С. 40–55.
- [8] *Efremov N.M., Adamiak B.Yu., Blochin V.I.* et al. // IEEE Transact. on Plasma Sci. 2000. Vol. 28. N 1. P. 224–229.
- [9] *Abou-Ghazala A., Katsuki S., Schoenbach K.H.* et al. // 28th Int. Conf. on Plasma Sci. and 13th Int. Pulsed Power Conf. Las Vegas, 2001.
- [10] *Воейков В.Л., Асфарамов Р.Р., Розенталь В.М.* // „Экополис 2000: Экология и устойчивое развитие города“. Мат. III Междунар. конф. М.: Изд-во РАН, 2000. С. 226–230.
- [11] *Zoeteman B.C., Hrubec J., de Greef E., Kool H.J.* // Environ Health Perspect. 1982. Vol. 46. P. 197–205.
- [12] *Gottlieb M.S., Carr J.K., Morris D.T.* // Int. J. Epidemiology. 1981. Vol. 10. P. 117–125.
- [13] *Price J.M.* Coronaries, Cholesterols, Chlorine. Banhadlog Hall, Tyliwch, Landridloes: Pyramid Publications Ltd., 1984. P. 32–33.
- [14] *Roodenburg B., Morren J., de Naan S.W.* et al. // Europ. Pulsed Power Symp., 2002.
- [15] *Летавет А.А., Тейлор Д.Х.* Основы космической биологии и медицины. Т. 2. Кн. 2. М.: Наука, 1975. С. 58–77.
- [16] *Sokolov V. and Stein G.* // J. Chem. Phys. 1966. Vol. 44. N 5. P. 1546–1551.
- [17] *Антилов А.М., Бархударов Э.М., Копьев В.А.* и др. // Прикладная физика. № 5. С. 74–80.
- [18] *Горячев В.Л., Рутберг Ф.Г., Уфимцев А.А.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 3. С. 91–95.
- [19] *Коликов В.А., Курочкин В.Е., Панина Л.К., Рутберг Ф.Г.* // ДАН. 2005. Т. 403. № 4. С. 561–563.
- [20] *Siegel H.* et al. Metal ions in biological systems. Concepts on metal ion toxicity. Vol. 20. New York & Basel: Marcel Dekker, 1986.
- [21] *Лайтинен Г.А.* Химический анализ. М.: Химия, 1966. 656 с.
- [22] *Богомолова Е.В., Горячев В.Л., Коликов В.А.* и др. // Пробл. мед. микол. 2003. Т. 5. № 2. С. 75.
- [23] *Богомолова Е.В., Горячев В.Л., Коликов В.А.* и др. // Микол. и фитопатол. 2003. Т. 37. Вып. 5. С. 19–25.
- [24] *Sondi I. and Sondi B.* // J. Colloid Interface Sci. 2004. N 275. P. 177–182.