

2000-103

на правах рукописи

**ТОКАРЕВ Андреан Валентинович**

УДК 533.9;537.523

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОННОГО  
ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА КАК ИСТОЧНИКА  
ПОЛУЧЕНИЯ ОЗОНА**

**01.04.14 - Теплофизика и молекулярная физика**

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Бишкек-2000

на правах рукописи

**ТОКАРЕВ Андреан Валентинович**

УДК 533.9:537.523

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОННОГО  
ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА КАК ИСТОЧНИКА  
ПОЛУЧЕНИЯ ОЗОНА**

**01.04.14 - Теплофизика и молекулярная физика**

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Бишкек-2000**

Работа выполнена на кафедре физики Кыргызско-Российского Славянского университета

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,  
профессор **Энгельшт В.С.**  
доктор физико-математических наук,  
профессор **Лелевкин В.М.**

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор **Жайнаков А.Ж.**

доктор технических наук  
профессор **Солоненко О.П.**

Ведущая организация:

Институт теплофизики Сибирского отделения Российской Академии Наук

Защита состоится " 29 " июня 2000 г. в 15 часов на заседании специализированного Совета ДО59.04.01 по присуждению ученых степеней доктора и кандидата наук в Кыргызско-Российском, Славянском университете:

Кыргызстан, 720000, Бишкек, ул. Киевская 44

С диссертацией можно ознакомиться в центральной научной библиотеке Кыргызско-Российского Славянского университета, г. Бишкек.

Автореферат разослан " 15 " мая 2000г.

Ученый секретарь диссертационного совета к.ф.-м.н

Семенов В.Ф.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Изучение электросинтеза озона имеет большое теоретическое, и практическое значения. В настоящее время образование озона в "барьерном" и "коронном" разрядах остаются практически единственными способами производства озона.

Глубоко исследованы вопросы связанные с электрической теорией озонаторов, кинетикой электросинтеза озона, механизмом образования озона в разряде барьерного озонатора (Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В., Емельянов Ю.М., Филиппов Ю.В.), разработаны энергосберегающие озонаторы на основе коронного разряда (Бородин И.ф., Першин А.Ф., Евдосеева А.Ю., Федоров А.В.), проводятся исследования генерации озона в импульсной короне (Амиров Р.Х., Асиновский Э.И., Самойлов И.С., Шепелин А.В.), исследуются вопросы связанные с воздействием барьерного и коронного разрядов на воду с целью ее обеззараживания (Пискарев И.М., Севастьянов А.И., Goldman.), получены удовлетворительные результаты по очистке воды различными видами импульсных разрядов (Сытник И. А. Павлович С. А., Жук Е. Г., Бубенцов В. Н. Бродская Б.Х., Энгельшт В.С, Токарев А.В.). В настоящее время мало работ посвящено исследованиям характеристик аномальной разновидности положительной короны - факельного разряда с точек зрения генерации озона и других окислителей, отсутствуют расчетные модели данного разряда.

Интерес к синтезу озона в коронных разрядах возрастает из-за достаточно высокой энергетической эффективности и простоты реализации метода. С энергетической точки зрения представляет научный и практический интерес аномальная разновидность положительной короны - "Факельный разряд" (название разряду дано В.И. Попковым по аналогии с факельным истечением плазмы из высокочастотного контура). Факельный разряд исследуется в основном в отношении потерь в линиях электропередачи. С технологической точки зрения в частности для синтеза озона факельный разряд, а точнее коронный факельный разряд (КФР) не исследуется. Ограничением применимости КФР, является необходимость использования сравнительно высоких напряжений (~150 кВ) и отсутствие достаточно широкого круга исследований особенностей горения разряда.

Поиск оптимальной формы разрядного контура и определение таких геометрических параметров электродов, при которых реализуется

устойчивый режим горения коронного факельного разряда при напряжениях (~30 кВ) является актуальным.

Электросинтез озона в КФР сопровождается большим числом химических процессов и до настоящего времени как отдельные его детали, так и в целом весь механизм образования озона практически не изучен. Поэтому не представляется возможным создание озонаторов на коронном факельном разряде без дополнительных исследований. В связи с этим, необходимо, провести исследования характеристик синтеза озона в КФР, в зависимости от изменения геометрии, расположения и полярности электродов, формы разрядного контура, подводимого напряжения и мощности источника питания, рабочего давления и химического состава газа.

Для оптимизации синтеза озона в КФР необходима разработка математических моделей протекающих физико-химических процессов, учитывающих пространственную неоднородность разряда, колебательно-поступательную и химическую неравновесность плазмы, кинетику атомно-молекулярных превращений.

В настоящее время развитие и внедрение новых экологически чистых технологий, например, безреагентных методов обеззараживания питьевых и сточных вод, становится жизненной необходимостью. Среди современных технологий очистки и обеззараживания питьевой воды прогрессируют передовые окислительные технологии (Advanced Oxidation Technology - AOT), основанные на совместном воздействии на воду окислителей (хлор, озон, перекись водорода), ультрафиолетового излучения (УФ), кавитационных явлений, ультразвука и т.п. Электрические разряды, реализуемые в воде или на ее поверхности, позволяют реализовать AOT в одном устройстве. Воздействие коронного факельного разряда на воду с целью ее обеззараживания (по доступным литературным данным) практически не рассматривается. Поэтому исследования дезинфекционных свойств КФР горящего на воду представляет большой интерес.

#### Цель и задачи работы

Целью данной работы является исследование условий формирования стабильного во времени коронного факельного разряда реализуемого при напряжениях до 30 кВ и комплексное изучение электрических, энергетических, теплофизических и плазмохимических (синтез озона и других окислителей) характеристик данного разряда.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- найти условия существования стабильного во времени КФР при напряжениях до 30 кВ;

- изучить статические и динамические характеристики КФР при различных параметрах разрядного контура;

- разработать модель физических и плазмохимических процессов в поле коронного факельного разряда;

- исследовать синтез озона в КФР из воздуха, кислорода и смесей газов. Найти оптимальные режимы генерации озона. Определить предельный энергетический выход озона для данного разряда;

- изучить особенности воздействия КФР на воду с целью ее обеззараживания.

Оптимизировать режимы с энергетической и технологической точек зрения.

#### Научная новизна:

1. Получен новый вид коронного факельного разряда при напряжении положительной полярности до 30 кВ на основе коронирующего электрода выполненного в виде диска, диаметром 5-10 мм плоскость которого расположена на расстоянии до 30 мм параллельно заземленному электроду;

2. Установлено, что одними из основных факторов определяющих стабильность КФР является оседание на коронирующей кромке электрода образующихся в разряде на воздухе ангидрида, азотной и азотистой кислот с последующим образованием солей металлов;

3. Выявлено, что ток в КФР имеет постоянную и импульсную составляющую, соотношение между которыми существенно зависит от напряжения на разрядном контуре;

4. Впервые проведены исследования синтеза озона в коронном факельном разряде горящем на воздухе, кислороде и его смесях с другими газами. Определен предельный энергетический выход озона для данного разряда;

5. Предложена математическая модель для численного анализа физических процессов в кислородной неравновесной плазме коронного факельного разряда с учетом химических реакций, включающих образование озона.

6. Установлено, что при взаимодействии плазмы КФР с водой в нее поступают перекись водорода, озон и соединения азота ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  и  $\text{NO}_3^-$ ). Результаты бактериологических исследований указывают на возможность применения данного разряда для очистки и обеззараживания воды.

### Практическая значимость:

1. Результаты исследований энергетических характеристик КФР дают возможность оптимизации процессов электронно-ионной технологии большой плотности ионов в объемах газа находящегося при высоком давлении. Удельная мощность разряда составляет  $8,5 \text{ кВт/м}^2$  коронирующей площади. Плотность ионного тока достигает величины  $0,34 \text{ А/м}^2$ ;

2. Технологические устройства со стабилизированными во времени параметрами на основе КФР можно реализовать при условии:  
а) Коронирующие элементы выполняются из коррозионностойких металлов или их сплавов; б) Электроды - диски диаметром 6-10 мм и толщиной 50 мкм, расстояние между дисками 2,5 см, расстояние до заземленного электрода до 30 мм; в) Рабочая среда - осушенный воздух или кислород;

3. Полученные данные о синтезе озона в КФР позволяют проектировать озонирующие установки использующие в качестве рабочей среды воздух или кислород;

Показана возможность создания на основе коронного факельного разряда устройств для очистки и обеззараживания воды с энергозатратами  $\sim 1 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$  воды.

### На защиту выносятся:

1. Коронный факельный разряд при напряжении положительной полярности до 30 кВ реализуемый путем подбора параметров коронирующих электродов от заостренного проводника к диску диаметром 6-10 мм и толщиной 50 мкм параллельного заземленной плоскости;

2. Результаты исследований механизмов влияющих на устойчивость горения КФР и способы позволяющие стабилизировать его характеристики;

а) дестабилизирующим фактором для существования разряда является оседание на электроды азотной и азотистой кислот и образование при этом солей металлов (например,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ); б) изготовление электродов из химически стойких металлов и удаление влаги из рабочего газа способствует стабилизации разряда.

3. Статические и динамические вольтамперные характеристики разряда позволяющие определить характер протекания тока и распределение электрического поля в коронном факельном разряде.

4. Математическая модель (уравнения, граничные условия, коэффициенты переноса, константы скоростей химических реакций) для

численного анализа физических процессов в кислородной плазме коронного факельного разряда.

5. Совокупность условий и требований к разрядному контуру необходимых для генерации озона из воздуха и кислорода при минимальных удельных энергозатратах. Обоснование возможности генерации озона с энергетической эффективностью близкой к термодинамическому пределу  $0,85 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кгO}_3$ .

Возможность обеззараживания воды с помощью коронного факельного разряда с энергозатратами на уровне  $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$ .

### Апробация

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 2<sup>й</sup> научной конференции Кыргызско-Российского Славянского университета (Бишкек-1995), International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry (Milovy, Czech Republic, September 2-4, 1996), Международной научно-теоретической конференции, посвященной 5-летию образования Кыргызско-Российского Славянского университета (Бишкек-1998), Третьем международном конгрессе "Вода: Экология и технология" ЭКВАТЕК-98 (Москва, 26-30 мая 1998 г.), на конференции "Физика плазмы и плазменные технологии" (15-19 сентября, Минск, Беларусь 1997), in the 14<sup>th</sup> Ozone World Congress in Dearborn, Michigan, USA (August 22-26, 1999).

Основные положения диссертации опубликованы в 14 печатных работах.

### Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы. Работа содержит 147 страниц текста, две таблицы и 85 рисунков. Список цитируемой литературы включает 104 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дана общая характеристика работы, актуальность изучения коронного факельного разряда с точки зрения получения озона, сформулированы цели и задачи работы, определены ее научная новизна и практическая ценность.

**В первой главе** приводится обзор данных о синтезе озона в химических и физических процессах. Проведен анализ методов получения озона с точек зрения энергетических затрат на единицу продукции и конструктивных особенностей озонаторов. Отдельно рассматривается получение озона в коронном разряде. Уделено внимание синтезу озона в

импульсной короне наносекундной длительности. Приводится анализ вопросов, связанных с обеззараживанием воды путем воздействия на нее электрических разрядов разных типов. Отдельно рассмотрены следующие виды разрядов: завершённые импульсные разряды под водой, завершённый импульсный разряд по поверхности воды, импульсная корона по поверхности воды, коронный и барьерный разряды на воду.

**Во второй главе** проанализированы характеристики факельного разряда при напряжениях на разрядном контуре до 150 кВ. Коронный разряд с положительного острия, провода или острой кромки может принять форму "Факельного разряда". Разряд имеет вид диффузного свечения заполняющего частично или полностью разрядный промежуток. Это особый тип разряда в воздухе при атмосферном давлении. Наибольший суммарный ток 20 мА/м группы факельных разрядов был измерен с фарфоровой трубки, имеющей 14 отверстий на длине  $L=400$  мм; этот ток в 50 раз больше тока, отнесенного к единице длины коронирующего провода, освобожденного от фарфоровой изоляции.

Приводится схема экспериментальной установки для исследования энергетических и плазмохимических свойств КФР реализуемого при пониженных (до 30 кВ) напряжениях. Не изменяемой частью установки является источник питания постоянного тока, позволяющий регулировать напряжение во вторичной цепи от 0 до 30 кВ при токе нагрузки до 10 мА. Нагрузкой источника питания являются сменные разрядные блоки, отличающиеся конструктивно друг от друга в зависимости от поставленной цели исследования. Основой блоков являются коронирующие электроды в виде дисков диаметром 5-10мм расположенных параллельно заземленному электроду (вода или металл). Установка позволяет регистрировать все электроэнергетические параметры разряда.

**Формирование нового типа КФР** осуществлялось путем изменения геометрических параметров коронирующего электрода и напряжения на разрядном контуре. Эволюция формы коронирующего электрода показана на рис. 1. В случае классического разрядного контура острие - плоскость (а) реализуется обычная положительная корона иногда переходящая в стримерную. При ориентации части электрода параллельно заземленной плоскости наблюдается относительно устойчивый стримерный режим горения разряда (б). Изготовление электрода в виде звездочки содержащей N лучей параллельных второму электроду (в - г) способствует не только стабилизации стримерного режима положительной короны, но и формированию некоторых признаков КФР. При увеличении числа лучей до бесконечности электрод в виде звезды вырождается в диск (д), с кромки

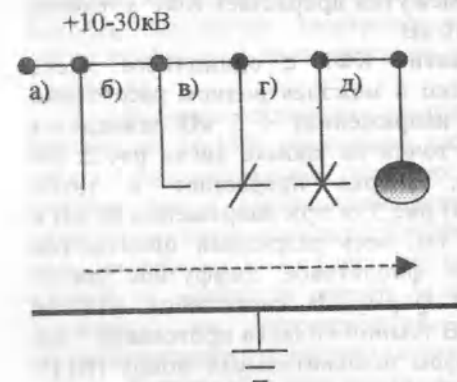


Рис.1. Эволюция формы коронирующего электрода: а) в виде острия, б) часть электрода параллельна заземленной плоскости, в-г) электрод в виде звезды содержащей N лучей, д) диск параллельный заземленной плоскости.

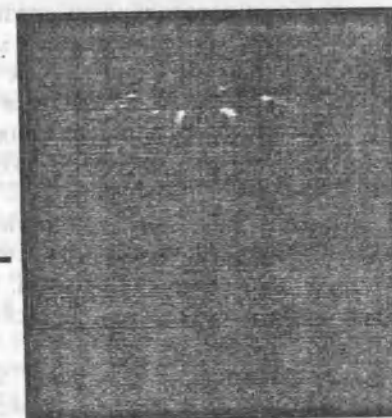


Рис. 2. КФР при напряжении 5 кВ.

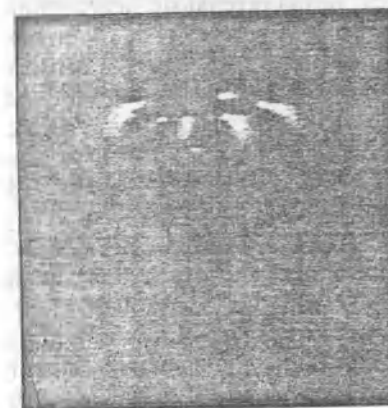


Рис. 3. КФР при напряжении U 12 кВ.

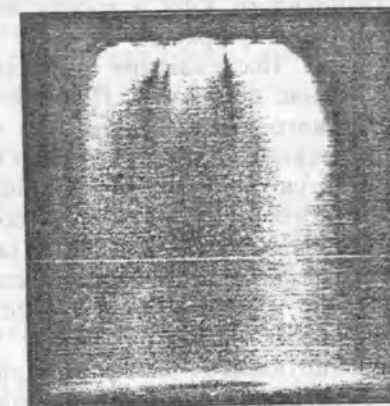


Рис. 4. КФР при напряжении 20 кВ.

которого в глубь разрядного промежутка прорастает КФР устойчивый в диапазоне напряжений 10-30 кВ.

Последовательность развития КФР с одиночного диска диаметром 10 мм толщиной 50 мкм и межэлектродном расстоянии 22 мм следующая: при низких напряжениях ~ 5 кВ загорается разряд в виде слабо светящихся точек на кромке диска рис.2. По мере возрастания напряжения, разряд прорастает в глубь разрядного промежутка ( $U = 12$  кВ) рис.3. и при напряжении 20 кВ и межэлектродном расстоянии 22 мм, весь разрядный промежуток заполняется разрядом, свечение фиолетовое диффузное рис.4. Разряд имеет колокол-образную форму. В светящейся области протекает основной ток разряда. В темной области протекание тока обеспечивается медленным дрейфом положительных ионов (Ю.П. Райзер).

Сохранение в течение длительного времени параметров разряда (силы тока, напряжения горения, формы разряда, температуры плазмы, вкладываемой мощности и т.п.) является необходимым условием применимости электрических разрядов в различных технологических приложениях. Основным показателем стабильности КФР в работе является незначительное изменение силы тока разряда в течение длительных промежутков времени горения. Исследования показали, что на силу тока разряда влияет состояние электродов. Под действием химически активной плазмы коронного разряда из воздуха образуются окислы азота, которые при взаимодействии с водяным паром превращаются в азотную или азотистую кислоты вызывающие коррозию диска - анода. В результате этого на электродах появляются кристаллы  $Cu(NO_3)_2$  зеленовато-голубого цвета, а также оседает в жидком виде  $N_2O_5$ . Оба указанные химические соединения являются диэлектриками, и поэтому их присутствие существенно влияет на силу тока КФР. Кристаллы  $Cu(NO_3)_2$  растут в сильном электрическом поле коронирующего диска и при определенных условиях могут отрываться от кромки диска, что приводит к уменьшению толщины диэлектрика на кромке и увеличению силы тока. Данный механизм, вероятно, обуславливает как длинно периодичные, так и коротко периодические пульсации силы тока разряда. Для стабилизации горения КФР предложено покрывать коронирующие электроды гальваническим способом слоем никеля толщиной порядка 10 мкм. Однако исследования показали, что уже через несколько десятков минут горения КФР коронирующая никелевая кромка полностью

разрушается, и начинаются те же самые процессы роста кристаллов  $Cu(NO_3)_2$  на частях электродов не покрытых никелем. Поэтому диски необходимо выполнять из сплошного коррозионно-стойкого материала.

В случае осушенного воздуха до точки росы  $-50$  °С сила тока разряда на 10-15% превышала аналогичные данные для влажного воздуха при нормальных условиях. Амплитуда пульсаций тока как коротко, так и длинно-периодичных, существенно уменьшилась и разряд горит более стабильно. Средняя скорость снижения силы тока во времени порядка 10 мкА/час. Это связано с замедлением образования азотной и азотистой кислот. Снижение силы тока обусловлено оседанием на коронирующей поверхности ангидрида  $N_2O_5$  способствующего ухудшению условий разряда.

**В третьей главе** изложены результаты исследования статических и динамических вольтамперных характеристик нового вида КФР реализуемого в кислороде или в воздухе, а также приведены результаты зондовых измерений распределения потенциала в зоне разряда.

Изучение характеристик одиночного КФР осуществлялась с помощью разрядного узла представляющего собой диск диаметром 10 мм и толщиной 50 мкм из меди расположенного параллельно заземленному электроду. Межэлектродное расстояние изменялось от 10 до 35 мм. На диск подавалось высокое напряжение (до 30 кВ) положительной полярности.

На рис.5. приведены вольтамперные характеристики одиночного КФР для различных межэлектродных расстояний. Участки АВ и АД (для межэлектродных расстояний 12 и 22мм.) вольтамперной характеристики соответствуют горению обычной положительной короны. При напряжении 15 и 23 кВ (для расстояний 12 и 22 мм.) свечение достигает противоположного электрода. При дальнейшем увеличении напряжения факельная корона переходит в дуговой или искровой разряд в зависимости от величины токоограничивающего резистора. Максимальный ток одиночного факела составляет 375 мкА при напряжении 15 киловольт и расстоянии от коронирующего электрода до сетки 12 миллиметров, область устойчивого горения ( $\Delta U_{фак}$ ) 5 кВ. Увеличение расстояния между электродами до 22 мм приводит к уменьшению наклона вольтамперной характеристики. Область устойчивого горения  $\Delta U_{фак}$  возрастает до 10 кВ.

Условием технологического использования данного разряда является заполнение достаточно большого объема многими одиночными факелами. С этой целью были изготовлены два разрядных блока состоящие из 36 коронирующих на сетку элементов. В одном из блоков коронирующие элементы выполнены в виде дисков из меди толщиной 50 мкм и диаметром 10 мм, в другом из нержавеющей стали толщиной 100 мкм и диаметром 10 мм. Изучение характеристик данных блоков показало, что целесообразнее использовать тонкие медные электроды, чем железные, так как наклон вольтамперных характеристик для меди меньше и, соответственно, область устойчивого горения  $\Delta U_{\text{фак}}$  больше в 2-2,5 раза (в зависимости от величины разрядного промежутка). Максимальная мощность, вложенная в разряд в экспериментах составляет 210 Вт на 36 коронирующих элементов или 8,5 кВт на 1 м<sup>2</sup> площади покрытой разрядом. Как показывает сравнение с литературными данными (Ю.П. Райзер) это высокие энергетические показатели для коронного разряда, позволяющие использовать его в различных плазменных и электрон-ионных технологиях.

Исследования характера протекания тока в коронном факельном разряде выявили следующие закономерности: для разряда в кислороде форма импульсов тока колоколообразная, длительность ~200 нс изменяющаяся в зависимости от напряжения рис.6. Амплитуда и частота следования импульсов тока существенно зависят от приложенного напряжения и химического состава газа. Напряжение зажигания коронного разряда, (который при дальнейшем повышении напряжения переходит в коронно-факельный) 11,2 кВ, при этом частота следования импульсов тока составляет порядка 800 Гц, по мере подъема напряжения частота плавно возрастает до 400 - 600 кГц. Средняя амплитуда импульсов тока по мере подъема напряжения до 12,5 кВ в начале возрастает от 3 до 4 мА, а затем понижается до 0,3 мА при 16кВ, и далее почти не изменяется до 20 кВ. Данные импульсы проходят на фоне постоянной составляющей тока рис.7. Вклад постоянной составляющей тока возрастает с увеличением напряжения и достигает величины 0,75 от общего тока при 20 кВ.

Несколько другая картина наблюдается для КФР реализуемого в воздухе. Амплитуда импульсов тока во всем спектре сигнала при фиксированном напряжении на разряде может отличаться до двух раз (3-6,8 мА) при напряжении на разрядном контуре 12 кВ. Девяносто процентов импульсов имеют амплитуду 3-4 мА. В экспериментах наблюдается быстрый рост частоты импульсов с единиц до 70 кГц при увеличении напряжения с 11 до 13 кВ. При дальней-

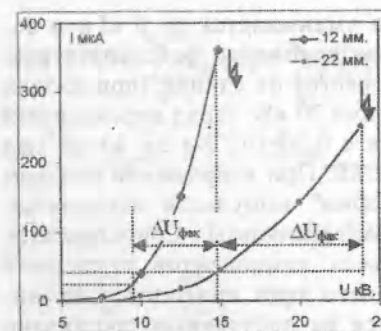


Рис. 5. Вольтамперные характеристики одиночного КФР для различных межэлектродных расстояний (12 и 22 мм).

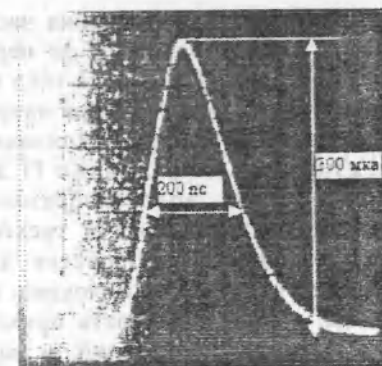


Рис. 6. Форма импульса тока КФР в кислороде

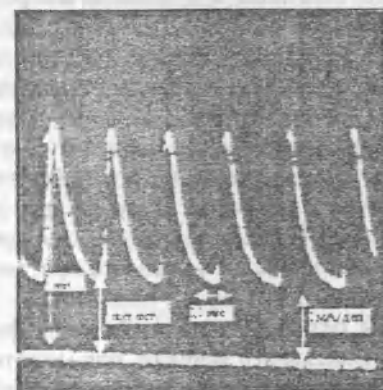


Рис. 7. Импульсная и постоянная составляющая тока КФР в кислороде

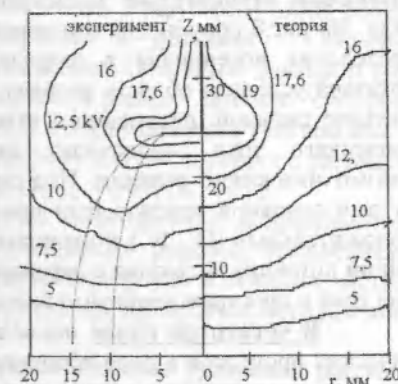


Рис. 8. Экспериментальное и теоретическое распределение потенциала в одиночном КФР, в воздухе атмосферного давления.



шем возрастании напряжения частота уменьшается до 6 кГц и сохраняет данную величину до перехода коронного факельного разряда в дуговой. Амплитуда тока изменяется от единиц (при низких напряжениях) до 200 мА при напряжении 20 кВ. Заряд переносимый одиночным импульсом увеличивается с  $0,76 \cdot 10^{-9}$  Кл до  $40 \cdot 10^{-9}$  Кл при изменении напряжения с 11 до 22 кВ. При напряжении близком к пробойному, "колоколообразная форма" импульсов искажается, появляются "двугорбые и трехгорбые" импульсы. Сопоставление вольтамперных характеристик для всех компонентов разрядного тока показывает, что половина среднего тока приходится на импульсы, а остальная часть приходится на постоянную составляющую. Сумма импульсной и постоянной составляющей тока с точностью в пределах погрешности эксперимента совпадает с током измеренным микроамперметром.

Для восстановления картины распределения электрического поля в разрядном промежутке использовался зондовый способ измерения потенциала относительно заземленного электрода в нужной точке разряда. На рис.8 совмещены изолинии измеренного и рассчитанного распределения потенциала в разряде, горящем в воздухе. Пунктиром показана условная область разряда, где визуально наблюдается максимальное свечение плазменного ствола, протекает большая часть электрического тока, происходит активная ионизация газа и идут плазмохимические реакции. Под диском и в области не ограниченной дугами основной перенос тока происходит за счет медленного дрейфа положительных ( $O^+$ ,  $N^+$ ) и отрицательных ( $O_2^-$ ,  $O^-$ ) ионов. Деформация линий потенциала связана с экранирующим действием области протекающего тока и пространственным униполярным зарядом.

**В четвертой главе** приведены результаты моделирования физических процессов в поле коронного факельного разряда. Для моделирования характеристик коронного факельного разряда используется двух температурная модель плазмы (М. Митчнер, Ю.П. Райзер, И.П. Брушлинский, С.В. Дресвин, В.М. Лелевкин, В.Ф. Семенов). Предполагается, что в неподвижной газовой среде распределение электронов по энергиям квазиравновесное, электрическое поле является определяющим фактором движения заряженных частиц, пренебрегается влиянием потока нейтрального газа. Для определения характеристик КФР используется система уравнений Максвелла, непрерывности и энергии для электронной и тяжелой компоненты плазмы:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \rho_e / \varepsilon_0, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = 0 \quad (1)$$

$$\operatorname{div}(n_j \vec{g}_j) = \sum_{ik} \alpha_{ik}^j n_i n_k - \sum_{ik} \beta_{ik}^j n_i n_k \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \left( \frac{5}{2} k T_e n_e \vec{g}_e \right) = \vec{j}_e \vec{E} - \frac{3}{2} k \delta_{\text{эмиссия}} n_e v_{ej} (T_e - T) + \operatorname{div}(\lambda_e \operatorname{grad} T_e) - \psi \quad (3)$$

$$\frac{3}{2} k \delta_{\text{фл}} n_e v_{ej} (T_e - T) + \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = 0$$

$$\rho_e = e \left( \sum_{i^+} n_{i^+} - \sum_{i^-} n_{i^-} - n_e \right) \quad \vec{g}_j = \pm \mu_{j3} \vec{E} - D_j \operatorname{grad}(\ln n_{j3})$$

где  $\rho_e$  - объемный заряд,  $\alpha$  и  $\beta$  - коэффициенты скоростей прямых и обратных реакций,  $v$  - скорости  $j$  частицы учитывающей дрейфовую и диффузионную составляющую.

Полагается, что к образованию озона в разряде ведут процессы связывания кислородных атомов и молекул, реакции ударной дезактивации и диссоциативной рекомбинации ионов. Разрушение озона происходит при электронной бомбардировке, в реакциях с атомами кислорода, и путем термического разложения. Основным фактором размножения электронов в кислороде принята реакция прямым электронным ударом. Для выбора рациональной модели процесса учитывалось 7 наиболее характерных частиц, образующих плазму коронного разряда в атмосфере молекулярного кислорода:  $O_3$ ,  $O_2$ ,  $O$ ,  $O^+$ ,  $O_2^-$ ,  $O_2^+$ ,  $e$ .

Система уравнений дополняется зависимостями коэффициентов переноса, константами скоростей химических реакций, уравнениями состояния с учетом различия температур электронов и тяжелых частиц. Дискретизация дифференциальных уравнений проводится методом контрольного объема.

Для решения системы дифференциальных уравнений рассматривается одиночный разрядный контур. Устанавливаются, граничные условия на контактной поверхности плазмы с электродами, на оси симметрии (ножке диска) и на свободной границе расчетной области.

Проведены расчеты при атмосферном давлении, диаметр диска коронирующего электрода  $d = 2-10$  мм, межэлектродное расстояние  $h = 10-25$  мм, длина стойки крепления дисков и стержневого коронирующего электрода одинаковы и равны 15 мм, диаметр стержневого электрода и стойки 0.2 мм, подводимое напряжение 10-20 кВ, расстояние между центрами соседних дисков (или стержней) в разрядной кассете равно 30 мм.

Из полученных результатов следует, что сильные электрические поля 30 кВ/см наблюдаются вблизи кромки коронирующих дисков и его

стойки. В этих областях максимальных значений достигает температура и концентрация электронов, которые в рамках ионизационно равновесной модели плазмы практически отслеживают изменения напряженности электрического поля.

Уменьшение межэлектродного расстояния приводит к увеличению напряженности электрических полей и температуры электронов, однако качественный характер в их распределении практически не изменяется. Очевидно, что при малом расстоянии между электродами суживается диапазон напряжений, при которых возможно существование коронного разряда, так как в этом случае увеличивается вероятность искрового пробоя. Взаимодействие электрических полей соседних коронирующих дисков при их сближении усиливают и деформируют поля во внешней области коронного разряда и практически не влияют на внутреннюю область разряда, примыкающую к коронирующим электродам.

Уменьшение диаметра коронирующего диска от  $d = 10$  мм до  $d = 0$  (соответствует острию) приводит к увеличению численных значений величин  $E$ ,  $T_e$  и поджатию изолиний полей к коронирующему электроду.

В распределениях концентраций заряженных и нейтральных частиц заметны формирования радиальных и аксиальных потоков плазмы от кромки коронирующего электрода (в форме «креста» в плоскости рисунка), что приводит к существенной неоднородности их полей. Характерные значения концентрации озона составляют  $\sim 10^{16} - 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Максимальная концентрация электронов наблюдается на кромках диска коронирующего электрода, а озона - в области разряда у поверхности заземленного электрода. В результате численных расчетов получено, что основная доля потерь энергии электронов идет на диссоциацию молекул. Поступательная температура тяжелых частиц в разряде близка к комнатной ( $\sim 350$ К). Коронный факельный разряд образуется в неоднородных электрических полях  $E \sim 10$  кВ/см, характеризуется высокой температурой электронов  $\sim 1-3$  эВ и концентрацией заряженных частиц  $\sim 10^9 + 10^{12}$  см<sup>-3</sup>.

В пятой главе приведены результаты исследования генерации озона в коронном факельном разряде из воздуха, кислорода и его смесей с другими газами. На основе экспериментальных данных определен предельный энергетический выход озона для КФР. Изучено влияние параметров разрядного контура на синтез озона.

Синтез озона из воздуха. Эксперименты проводились в воздухе атмосферного давления при температуре 26 °С. В качестве коронирующих электродов использовались диски из медной фольги толщиной 50 мкм и фольги из нержавеющей стали толщиной 100 мкм. Электроды (до

34 шт.) на расстоянии 2,5 см друг от друга закреплялись в кассете параллельно заземленной сетке. На электроды подавалось напряжение положительной полярности до 22 кВ. Получены зависимости удельных энергозатрат на синтез озона из атмосферного воздуха от напряжения, толщины коронирующих электродов и межэлектродного расстояния. Общей особенностью полученных зависимостей является переход удельных энергозатрат через минимум, при увеличении напряжения. Для каждой толщины коронирующего диска, в зависимости от расстояния электрода до сетки, существует свое оптимальное напряжение, при котором достигается минимум удельных энергозатрат идущих на синтез озона. Для используемого источника питания, при средних расстояниях (20 мм) на тонких электродах получается максимальная производительность 4,5 г озона в час, но при этом реализуются относительно высокие удельные энергозатраты до 48 кВт·ч/кг озона. При меньших расстояниях ( $d \sim 15$  мм) на тонких электродах достаточно высокая производительность озона 4 г в час, и вполне приемлемые энергозатраты - порядка 32 кВт·ч/кг озона.

Получение озона из кислорода. Изучение особенностей синтеза озона из кислорода производилась в потоке. Коронирующие диски установлены последовательно по потоку газа и подсоединены параллельно к источнику питания. Противолежащий электрод охлаждался проточной водой. Давление в озонаторе несколько превышало атмосферное. Изменяемыми параметрами являлись напряжение, число дисков, расход газа.

Зависимость мощности разряда от числа дисков носит линейный характер. Причем, при увеличении расхода газа она возрастает, составляя 22,8 Вт для 0,044 м<sup>3</sup>/час и 31 Вт для расхода кислорода 0,144 м<sup>3</sup>/час для 34 дисков при напряжении 20 кВ. Изменение концентрации озона на выходе озонатора от числа последовательно соединенных (по потоку газа) дисков носит также линейный характер. Она составляет 11,15 г/м<sup>3</sup> при расходе 0,044 м<sup>3</sup>/час и 7,66 г/м<sup>3</sup> для расхода 0,144 м<sup>3</sup>/час. Энергозатраты увеличиваются с 5,5 кВт·ч/кг до 34 кВт·ч/кг, при изменении количества дисков от 1 до 10. Увеличение расхода газа в 2-3 раза приводит к снижению энергозатрат с 53 кВт·ч/кг до 32 кВт·ч/кг и при дальнейшем увеличении числа дисков (при расходе 0,092 м<sup>3</sup>/час и 0,144 м<sup>3</sup>/час) остается на этом уровне.

Исследования показывают, что вблизи напряжения зажигания коронного разряда можно генерировать озон из кислорода с энергозатратами, близкими к теоретически минимальному пределу 0,835 кВт·ч/кг с относительно высокой производительностью. Это вероятно связано с тем, что вблизи напряжения зажигания коронного разряда су-

существует область перехода темного Таунсендовского разряда в обычную положительную корону. Здесь практически весь озон, генерируемый с КПД, близким к 100 % выносится за пределы разряда без разрушения, несмотря на то, что кислороду приходится последовательно проходить до 34 зон коронного разряда. Т.е. в переходной области равновесие реакции получения озона из кислорода  $3O_2 \rightleftharpoons 2O_3$  практически необратимо сдвинуто вправо, т.е.  $3O_2 \rightarrow 2O_3$ . В нашем случае при горении 34 одиночных КФР при мощности 0,5 Вт была получена концентрация  $0,78 \text{ г/м}^3$ , производительность  $0,32 \text{ г/час}$  и удельные энергозатраты  $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$ .

Синтез озона из смесей газов. Исследование особенностей синтеза озона из смесей газов показало, что при малых концентрациях кислорода в смесях с газами  $N_2$ ,  $CO_2$  и  $Ar$  синтез озона происходит эффективнее при уменьшении концентрации  $O_2$  в смеси. Этот эффект проявляет себя как через степень превращения кислорода в озон, т.е. отношение концентрации  $O_3$  к концентрации  $O_2$  в смеси, так и через удельные энергозатраты, которые зависят от концентрации  $O_2$  в смеси. При стремлении концентрации  $O_2$  к нулю степень превращения  $O_2$  в  $O_3$  увеличивается примерно на два порядка по сравнению с её средним уровнем, а удельные энергозатраты устремляются к термохимическому пределу  $0,835 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$ .

Исследования показали, что наиболее оптимальные режимы синтеза озона наблюдаются при диаметрах коронирующего электрода 8-10 мм. Удельные энергозатраты в этом случае составляют  $41 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$ , при концентрации озона на выходе из озонирующего блока  $\sim 3 \text{ г/м}^3$ . Уменьшение межэлектродного расстояния с 15 мм до 10 мм также приводит к снижению удельных энергозатрат. Уменьшение напряжения на разрядном промежутке (при постоянном расстоянии между электродами) позволяет снизить удельные энергозатраты с 74 до  $40 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$ . Концентрация озона при этом уменьшается с 1,7 до  $1,17 \text{ г/м}^3$ . При уменьшении толщины диска с 45 до 22 мкм удельные затраты увеличиваются с 59 до  $82 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$ , а концентрация озона на выходе уменьшается до  $1,53 \text{ г/м}^3$ .

В шестой главе приведены результаты исследования воздействия коронного факельного разряда на воду. Изучено изменение химического состава воды при взаимодействии с разрядом. Приводятся результаты исследований по обеззараживанию КФР искусственно зараженной воды.

Большинство компонентов АОТ в одном технологическом устройстве реализуется путем воздействия на поверхность воды коронным

факельным разрядом. Над слоем воды, параллельно её поверхности, располагаются диски из нержавеющей стали, толщиной 100 мкм и диаметром 6 мм подсоединенные к источнику высокого напряжения. Вода является вторым заземленным электродом. При подаче на диски напряжения (до 20 кВ) между дисками и водой зажигается КФР. В разрядном промежутке в результате плазмохимических реакций идет синтез перекиси водорода, озона, ОН радикалов и др. соединений интенсивно поступающих в воду под действием электрического ветра. Одновременно с этим происходит её УФ облучение. Эксперименты проводились с водопроводной водой. В воде предварительно определялось количественное содержание хлора, которое вычиталось из общего количества окислителей после воздействия на воду положительной короны. Воздействие на воду, осуществлялось в трех режимах: 1- свободно горящий разряд, 2 - через зону разряда непрерывно прокачивается воздух, 3 - разряд в замкнутом объеме.

Изменение химического состава воды. При горении КФР вместе с перекисью водорода и озоном из воздуха в воду поступают сопутствующие азотсодержащие соединения. В таб.1, приведены зависимости концентрации азотсодержащих соединений от времени обработки

Таблица 1

t, мин.	$NH_4^+$ мг/л	$NO_2^-$ мг/л	$NO_3^-$ мг/л
0	0,02	0,05	5,6
1	0,04	0,14	5,75
2	0,037	0,24	6,45
4	0,15	0,28	6,75
8	0,20	0,375	7,05
16	0,27	0,9	10,3

воды. Средние скорости увеличения концентраций азотсодержащих соединений в воде при горении разряда равны:  $W_{NH_4^+} = 0,0156 \text{ мг/(л}\cdot\text{мин)}$ ,  $W_{NO_2^-} = 0,0531 \text{ мг/(л}\cdot\text{мин)}$ ,  $W_{NO_3^-} = 0,294 \text{ мг/(л}\cdot\text{мин)}$ . Исходя из того, что предельно допустимые концентрации (ПДК) в воде составляют:  $NH_4^+$  - 2 мг/л,  $NO_2^-$  и  $NO_3^-$  - 10 мг/л, то можно определить максимально допустимый период обработки воды:  $T_i = C_i/W_i$ , где  $C_i$ -ПДК,  $W_i$  - скорость увеличения концентрации i-компоненты в воде. Вычисления дают следующие периоды: T

$(\text{NH}_4^+) = 128$  мин,  $T(\text{NO}_2^-) = 188$  мин,  $T(\text{NO}_3^-) = 34$  мин. Превышение этих значений ( $t > T_i$ ) вызывает увеличение концентрации азотсодержащих соединений свыше ПДК. Видно, что даже самый короткий период накопления ПДК для  $\text{NO}_3^-$  приблизительно на порядок превышает необходимое время для обеззараживания воды с помощью коронного разряда. Поэтому побочного влияния образующихся в разряде азотсодержащих соединений можно не опасаться.

При изменении параметров разрядного контура существенным образом изменяются энергетические характеристики коронного факельного разряда. Что в свою очередь сказывается на энергетической эффективности синтеза продуктов плазмохимических реакций. Изменение межэлектродного расстояния с 16 до 24 мм приводит к увеличению мощности разряда с 56 до 78 Вт, так как величина напряжения необходимого для поддержания нужного режима возрастает. Концентрация окислителей в воде (озон + перекись водорода) для данного случая увеличивается с 8,9 до 21 г/м<sup>3</sup>. При максимальной мощности и концентрации окислителей производительность установки составляет 0,25 г/час. Выявлено, что уменьшение разрядного промежутка приводит к увеличению удельных энергозатрат. Для расстояния 16 мм  $W = 530$  кВт·час/кг. Затраты уменьшаются до 300 кВт·час/кг при увеличении промежутка до 24 мм. Что связано с изменением условий массообмена между водой и плазмообразующим газом. Зависимости удельных энергозатрат на синтез окислителей от времени воздействия разряда на воду (для различных условий обмена воздуха в разрядной области) приведены на рис.9. Кривая 1 соответствует разряду, горящему на воду в свободной атмосфере, 2 - атмосферный воздух непрерывно прокачивается через зону разряда, 3 - воздух циркулирует по замкнутому контуру через зону разряда. Для всех трех зависимостей наблюдается снижение удельных энергозатрат в течение первых 5-6 минут с момента включения разряда. Затем происходит рост удельных энергозатрат. Это связано с тем, что в начальные моменты времени происходит прогрев поверхности воды до температуры, при которой в зоне разряда устанавливается наиболее оптимальное соотношение между воздухом и парами воды, при котором происходит максимальная наработка окислителей (перекись водорода и озон) при минимальных энергозатратах. Минимальные энергозатраты получены в случае циркуляции воздуха через зону разряда по замкнутому контуру (3) рис.9. - 100 кВт·час/кг. На рис. 9 штриховой линией

показан максимальный уровень промышленно-рентабельных показателей синтеза окислителей для обеззараживания воды. Этот показатель находится в интервале 25-35 кВт·час/кг. В экспериментах удельные затраты в 3-4 раза выше данного показателя. Концентрация окислителей (зависимость 3 рис. 9.) в воде после 6 минут обработки составляет 50 г/м<sup>3</sup>, что в пять раз превышает максимально необходимое количество реагента (хлора, озона или перекиси водорода) для ее обеззараживания.

**Обеззараживание воды коронно-факельным разрядом.** Исследования проведены на искусственно зараженной воде, представляющей собой смесь не хлорированной водопроводной воды с введенными условно патогенными бактериями *E. Coli* концентрацией >1100 особей/мл. Исходная вода содержала ионы меди в количестве 0,5 мг/л, для каталитического разложения перекиси водорода и активизации процесса обеззараживания воды. Время горения факельного разряда на воду составляло 1, 2, 6, 8, 10, 12 минут, что соответствует выработке перекиси водорода в количестве 5-44 г/м<sup>3</sup>. Результаты бактериологических анализов приведены на рис.10. Как видно из рисунка, двух минутное воздействие разряда позволяет снизить коли-титр воды до трех. Общее микробное число имеет нулевое значение. Удельный расход энергии на обеззараживание 1м<sup>3</sup> воды составляет ~ 1.1 кВт·час/м<sup>3</sup>.

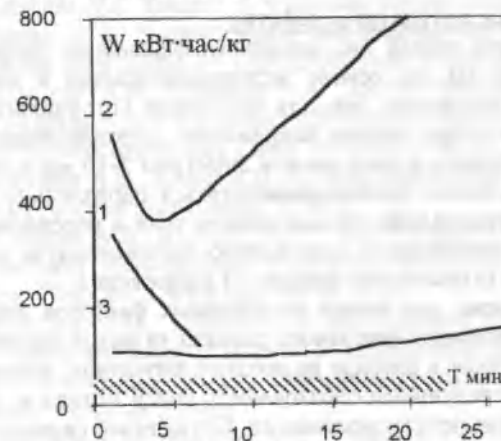


Рис. 9. Зависимость удельных энергозатрат на синтез окислителей от времени воздействия разряда. 1- разряд горит в свободной атмосфере, 2 - в потоке воздуха, 3- в замкнутом объеме.

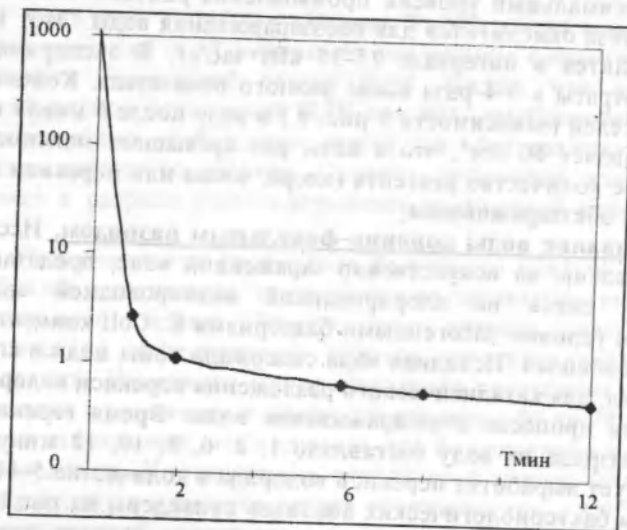


Рис. 10. Зависимость коли-титра воды от времени воздействия КФР.

### Основные результаты работы:

1. Получен новый вид коронного факельного разряда при напряжениях до 30 кВ. На основе экспериментальных и теоретических исследований установлено, что для получения устойчивого коронного факельного разряда при данных напряжениях коронирующие электроды необходимо выполнять в виде дисков диаметром 5-10 мм и толщиной 50 мкм. Плоскость дисков должна располагаться параллельно заземленному электроду. Установлено, что протекание тока в коронном факельном разряде имеет постоянную и импульсную составляющую, соотношение между которыми существенно зависит от напряжения;

2. Выявлено, что одним из основных факторов определяющих устойчивость коронного факельного разряда является оседание на электроды образующихся в разряде на воздухе ангидрида, азотной и азотистой кислот с последующим образованием солей металлов, являющихся диэлектриками или полупроводниками. Осушенный силикагелем воздух способствует некоторой стабилизации горения коронного разряда;

3. Предложена математическая модель (уравнения, граничные условия, коэффициенты переноса, константы скоростей химических реакций) для численного анализа физических процессов в кислородной

плазме коронного факельного разряда с учетом наиболее вероятного механизма химических реакций, включающих образование озона в условиях термодинамической неравновесности рабочей среды. Проведен численный анализ влияния формы и размеров коронирующего электрода и разрядного контура, подводимого напряжения на величину и распределение электрического поля в термически и химически неравновесной плазме;

4. Определен предельный энергетический выход озона для данного разряда, величина которого близка к термодинамическому (0,824 кВт·ч/кг) пределу образования озона. Показана возможность использования коронного факельного разряда для создания технологических озонаторов позволяющих получать озон с энергетической эффективностью 1-50 кВт·ч/кг при концентрации озона 0,1-15 г/м<sup>3</sup>;

5. Установлено, что при взаимодействии плазмы с водой в нее поступают перекись водорода, озон и соединения азота (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> и NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Результаты бактериологических исследований указывают на возможность применения данного разряда для очистки и обеззараживания воды.

Основные результаты исследований опубликованы в следующих работах:

1. Энгельшт В. С., Токарев А. В. Импульсная корона по поверхности воды. // Тезисы докладов 5<sup>ой</sup> всесоюзной конференции по физике газового разряда. (Омск, май, 1990). - с. 35.

2. Engelsht V.S. Tokarev A.V. Impulse corona discharge erupting over the mater sinudge. // 25 Summer school and international Symposium on the physics of ionized gases. (Sept. 3-7 1990, Dubrovnik, Yugoslavia). - p. 87.

3. Токарев А.В., Юданов В.А. Электрические характеристики факельного разряда. // 2-я научная конференция Кыргызско-Российского Славянского университета. Тез. Докл.-Бишкек, 1995. - с. 23.

4. Токарев А.В., Юданов В.А. Предварительный патент №-104. Озонатор. Кыргызская республика. 1995 г.

5. Токарев А.В., Юданов В.А. Синтез озона в факельном разряде. // 2-я научная конференция Кыргызско-Российского Славянского университета. (Тез. Докл.-Бишкек, 1995). - с. 24.

6. Leievkin V.M., Tokarev A.V. and Yudanov V.A. Electrical characteristics of torch discharge. // Hakone 5. International symposium on high pressure, low temperature plasma chemistry, Contributed papers, Milovy. (Chech republic 1996). - p. 273-275.

7. Leievkin V.M., Tokarev A.V., Yudanov V.A. Ozone synthesis in a torch discharge. // Hakone 5 - International symposium on high pressure, low temperature plasma chemistry. Contributed papers. (Milovy, Chech republic, 1996)-p. 328-333.

8. Козлов П.В., Лелевкин В.М., Семенов В.Ф., Токарев А.В., Юданов В.А., Kim K.S. Моделирование физических процессов в поле коронного разряда. //Конференция "Физика плазмы и плазменные технологии" Сб. тез. и докл. (Минск, Беларусь, 1997).-с.17-20.

9. Лелевкин В.М., Ткченко В.С., Токарев А.В., Юданов В.А., Kim K.S. Воздействие коронного факельного разряда на воду. //Сборник научных трудов международной научно-теоретической конференции, посв. 5-летию образования КРСУ. (Бишкек, 1998).- с.22-37.

10. Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А., Ткаченко В.С., Kim K.S. Воздействие факельного разряда на воду. //Третий международный конгресс «Вода: экология и технология» - ECWATECH-98. (Москва, 1998). -с. 344-345.

11. Leievkin V.M., Tokarev A.V., Yudanov V.A., Kim K.S., Tkachenko V.S. Synthesis of ozone from mixes of gases in corona torch discharge. In the 14 Ozone World Congress. (Dearborn, Michigan, USA, 1999).- p.145-153.

12. Токарев А.В., Юданов В.А., Kim K.S. Устойчивость горения коронно факельного разряда. Сборник научных трудов. Выпуск 2 / Кыргызско-Российский Славянский университет. (Бишкек, 2000).- с. 12-16.

13. Токарев А.В., Юданов В.А., Kim K.S. Влияние параметров разрядного контура на синтез озона в коронном факельном разряде. Сборник научных трудов. Выпуск 2 / Кыргызско-Российский Славянский университет. -Бишкек, 2000.- с. 17-23.

14. Токарев А.В., Юданов В.А., Kim K.S. Импульсный характер факельного разряда. Сборник научных трудов. Выпуск 2 / Кыргызско-Российский Славянский университет. (Бишкек, 2000).- с. 24-28.

Подписано к печати 3.05.00. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Офсетная печать. Объем 1,5 п.л.

Тираж 100 экз. Заказ 83.

Издательство Славянского университета

---

Отпечатано в типографии КРСУ, г.Бишкек, ул.Шопокова, 68.