

2001-218

*На правах рукописи*

**КИМ Кён Сук**

УДК 533.9:537.523

**ТЕПЛОВЫЕ  
И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
ПРИ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИИ ВОДЫ  
ЛИНЕЙНЫМ КОРОННЫМ  
ФАКЕЛЬНЫМ РАЗРЯДОМ**

Специальность 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

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук,  
профессор Лелевкин В.М.

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,  
профессор Косый И.А.  
доктор физико-математических наук,  
профессор Энгельшт В.С.

**Ведущая организация:**

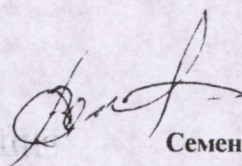
Институт Физики Национальной Академии наук Кыргызской Республики.

Защита состоится "21" декабря 2000 г. в 15 часов на заседании специализированного Совета Д059.04.01 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 "17" ноября 2000г.

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



Семенов В.Ф

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время развитие и внедрение новых экологически чистых технологий, например, безреагентных методов обеззараживания питьевых и сточных вод, становится жизненной необходимостью и представляет большой практический интерес. Среди современных технологий очистки и обеззараживания питьевой воды прогрессируют передовые окислительные технологии (Advanced Oxidation Technology – АОТ), основанные на совместном воздействии на воду окислителей (хлор, озон, перекись водорода), ультрафиолетового излучения (УФ), кавитационных явлений, ультразвука и т.п. Электрические разряды, горящие в воде или на ее поверхности, позволяют реализовать АОТ в одном устройстве.

Исследованы следующие виды воздействия на воду электрическими разрядами: 1) Завершенные импульсные разряды под водой (Сытник И.А., Gilliland S.E., Speck M.L., Павлович С.А., Осипов Г.П., Жук Е.Г., Бубенцов В.Н.). 2) Завершенные импульсные разряды по поверхности воды (Бродская Б.Х., Кирсо У., Губергриц М.Я.). 3) Импульсная корона по поверхности воды (Амиров В.Х., Асиновский Э.И., Энгельшт В.С., Токарев А.В.). 4) Коронный и барьерный разряды на воду (Гриневиц В.И., Кувыкин Н.А., Бубнов А.Г., Пискарев И.М., Севастьянов А.И., А. Goldman, M. Goldman, R.S. Sigmond). 5) Коронный факельный разряд на поверхность воды (Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А., Ким К.С.).

Приведенные методы не находят широкого распространения по ряду причин технологического и экономического характеров. С этих точек зрения представляет большой интерес линейный коронный факельный разряд (ЛКФР).

Воздействие ЛКФР на воду с целью ее обеззараживания (по доступным литературным данным) практически не рассматривается. Тем не менее, данный разряд обладает рядом характеристик позволяющих рекомендовать его для технологического использования.

Для технологического использования дезинфекционных свойств ЛКФР горящего на воду важным показателем является его стационарность во времени. Известно, что на устойчивость коронного факельного разряда с дискового электрода влияют многие факторы: напряжение, форма электродов, межэлектродное расстояние, состав газа и др. Проведенные исследования позволили вскрыть основные факторы, влияющие на стабильность разряда, но не было найдено простых способов их исключения. Исследования показывают, что наложение импульсной составляющей на постоянное напряжение коронного факельного разряда позволяет не только стабилизировать его энергетические параметры, но

и реализовать пульсирующий разряд, как с диска, так и в любых других конфигурациях разрядного контура (острие-плоскость, проводник в цилиндре, два параллельных проводника, провод над плоскостью и др.). При обеззараживании воды ЛКФР происходит синтез не только перекиси водорода, но и озона из воздуха. Особенности электросинтеза приведенных соединений в данном разряде сопровождается большим числом химических процессов и до настоящего времени практически не изучен. Поэтому не представляется возможным создание технологических устройств на основе ЛКФР без дополнительных исследований. В связи с этим, необходимо, исследовать электрические и плазмохимические характеристики синтеза озона и перекиси водорода в ЛКФР, 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 процесса обеззараживания воды разрядом и синтеза озона в ЛКФР необходима разработка математических моделей протекающих физико-химических процессов, учитывающих пространственную неоднородность разряда, колебательно-поступательную и химическую неравновесность плазмы, кинетику атомно-молекулярных превращений.

Поэтому комплексное исследование физико-химических явлений протекающих в поле линейного коронного факельного разряда является актуальной задачей.

**Цель и задачи работы.** Исследование условий формирования стабильного во времени линейного коронного факельного разряда реализуемого при напряжениях до 30 кВ и комплексное изучение электрических, энергетических, теплофизических и плазмохимических (синтез озона и перекиси водорода) процессов протекающих при обеззараживании воды под воздействием данного разряда.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: найти условия существования стабильного во времени линейного коронного факельного разряда при напряжениях до 25 кВ;

изучить статические и динамические характеристики ЛКФР при различных параметрах разрядного контура;

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

изучить процессы, протекающие при воздействии ЛКФР на воду с целью ее обеззараживания и найти оптимальные режимы горения с энергетической и технологической точек зрения;

исследовать синтез озона в ЛКФР горящего в воздухе, и кислороде, найти оптимальные режимы генерации озона и определить предельный энергетический выход озона для данного разряда.

#### Научная новизна:

1. Получен новый вид линейного коронного факельного разряда при напряжении положительной полярности до 25 кВ реализуемый в любых конфигурациях разрядного контура (диск параллельный плоскости, нить-плоскость, острие плоскость, провод в цилиндре и др.);

2. Установлено, что одними из основных факторов определяющих стабильность ЛКФР является наличие в разрядной цепи иницирующего разрядника;

3. Выявлено, что ток в ЛКФР имеет основную импульсную составляющую и второстепенную по величине постоянную;

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

5. Впервые проведены исследования синтеза озона в линейном коронном факельном разряде, горящем на воздухе и кислороде;

6. Определены основные процессы, приводящие к разрушению и генерации перекиси водорода при воздействии ЛКФР на воду. Результаты бактериологических исследований указывают на возможность применения данного разряда для очистки и обеззараживания воды в потоке;

7. Выявлено, что при взаимодействии плазмы ЛКФР с водой в нее поступают кроме перекиси водорода и озона следующие соединения азота ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  и  $\text{NO}_3^-$ ) в концентрациях ниже предельно допустимых норм.

#### Практическая значимость:

1. Результаты исследований энергетических характеристик ЛКФР показывают преимущества данного разряда при использовании в процессах электронно-ионной технологии в газах находящихся при высоком давлении. Удельная мощность разряда составляет  $6 \text{ кВт/м}^2$  коронирующей площади. Плотность ионного тока достигает величины  $0,34 \text{ А/м}^2$ ;

2. Технологические устройства со стабилизированными во времени параметрами на основе ЛКФР можно реализовать при наличии в разрядной цепи иницирующего разрядника;

3. На основе линейного коронного факельного разряда возможно создание устройств для обеззараживания и очистки воды с энергозатратами до  $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$  воды;

4. Полученные данные о синтезе озона в ЛКФР позволяют проектировать озонирующие установки, использующие в качестве рабочей среды воздух или кислород;

### На защиту выносятся:

1. Линейный коронный факельный разряд при напряжении положительной полярности до 25 кВ горящий с провода на плоскость. Разряд формируется за счет инициирующего разрядника введенного в разрядный контур;

2. Механизмы, влияющие на устойчивость горения ЛКФР и способы позволяющие стабилизировать его характеристики;

3. Статические и динамические вольтамперные характеристики (ВАХ) разряда определяющие механизмы протекания тока;

4. Математическая модель (уравнения, граничные условия, коэффициенты переноса, константы скоростей химических реакций) для численного анализа физических процессов в кислородной плазме коронного факельного разряда;

5. Механизмы плазмохимических реакций, способствующие генерации и разрушению перекиси водорода при обеззараживании воды ЛКФР;

6. Совокупность условий к разрядному контуру необходимых для генерации озона из воздуха и кислорода при минимальных удельных энергозатратах.

**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 10 печатных работах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Работа содержит 119 страниц текста, две таблицы и 61 рисунок. Список цитируемой литературы включает 137 наименования.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, актуальность изучения линейного коронного факельного разряда с точки зрения обеззараживания воды и получения озона. Сформулированы цели и задачи

работы, определены ее научная новизна и практическая ценность. Приведен обзор известных работ по тематике исследования. 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.

В первой 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 измерен с фарфоровой трубки, имеющей 14 отверстий на длине  $L=400$  мм, который в 50 раз больше тока, отнесенного к единице длины коронирующего провода, освобожденного от фарфоровой изоляции. Для сравнения приведены характеристики коронного факельного разряда горящего с диска.

Разработана схема экспериментальной установки для исследования энергетических и плазмохимических свойств ЛКФР реализуемого при пониженных (до 25 кВ) напряжениях. Изменяемой частью, является высоковольтный источник питания постоянного тока позволяющий регулировать напряжение во вторичной цепи от 0 до 25 кВ при токе нагрузки до 10 мА. Установка позволяет регистрировать электроэнергетические параметры разряда путем измерения тока и напряжения горения. Установка оснащена необходимыми средствами для осциллографических исследований. Нагрузкой источника питания являются сменные разрядные блоки, отличающиеся конструктивно друг от друга в зависимости от поставленной цели исследования. Разрядный блок состоит из коронирующего электрода в виде провода из нихрома диаметром 0,5 мм, расположенного параллельно заземленному электроду (вода или металл).

Главной частью установки является инициирующий разрядник, состоящий из двух шаровых электродов расположенных на расстоянии 0,1-0,5 мм друг от друга. Параллельно разряднику подключен конденсатор емкостью 3 пикофарада. Инициирующий разрядник включен последовательно в разрядную цепь со стороны не коронирующего электрода. Это техническое решение позволяет перевести обычную положительную корону с провода в устойчивый линейный коронный факельный разряд.

**Общая картина развития разряда.** Выявление общей картины формирования и снятие вольтамперных характеристик линейного коронного факельного разряда осуществлялась с помощью разрядного узла представляющего собой провод из нихрома длиной 220 мм, диаметром 0,5 мм располагаемого на расстоянии 20-30 мм параллельно плоскости. На провод подавалось высокое напряжение (до 25 кВ) положительной полярности, электроды в иницирующем разряднике устанавливались на расстоянии  $h=0,4$  мм. Емкость в разряднике 4 пФ.

Из визуальных и фотографических исследований выявлена следующая последовательность развития ЛКФР: 1. По мере возрастания напряжения (до пробоя иницирующего разрядника) у провода наблюдается слабое свечение характерное для положительной короны. 2. При первом искровом пробое разрядника разряд внезапно прорастает в глубину разрядного промежутка. 3. При напряжении 15 кВ и межэлектродном расстоянии  $d=30$  мм весь межэлектродный промежуток заполняется разрядом, свечение которого диффузное фиолетовое. На проводе заметны точки, к которым стекается разряд (рис.1.). 4. При напряжении 17 кВ яркость свечения увеличивается, ток возрастает до 600 мкА. 5. При напряжении 18,5 кВ и токе 1000 мкА полностью развитый разряд имеет однородную структуру, как по объему, так и по длине провода (рис.2.). Коронирующий провод на всех рисунках расположен сверху, второй электрод-плоскость в нижней части рисунка. Сечение разряда представляет собой параболу, вершина которой расположена на проводе коронирующего электрода, а ее ветви по нормали входят в плоскость второго электрода. Внутри параболы наблюдается периферийная зона фиолетового свечения и центральная - бледно голубого цвета. В этих областях протекает основной ток разряда. За пределами разряда протекание тока обеспечивается медленным дрейфом тяжелых положительных и отрицательных ионов  $N^+$ ,  $O^+$ ,  $O^-$  и т.п. На рисунках приведены фотографии за время экспозиции 15 секунд. Для сравнения на рис.3 показана обычная положительная корона (напряжение 18,5 кВ, ток разряда 100 мкА), а на рис.4 приведен коронный факельный разряд горящий с диска. Можно отметить отличия КФР и ЛКФР от положительной короны, это качественно - вид разряда, а количественно - ток линейного коронного факела при равных условиях в десятки раз превышает ток положительной короны.

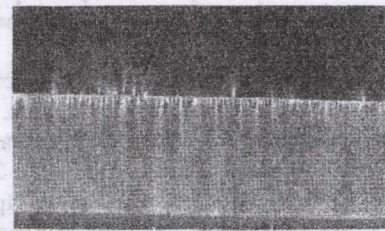


Рис.1. Линейный коронный факельный разряд:  $U=15$  кВ,  $d=30$  мм.

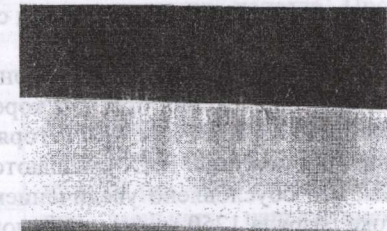


Рис.2. Линейный коронный факельный разряд:  $U=18,5$  кВ,  $d=30$  мм.

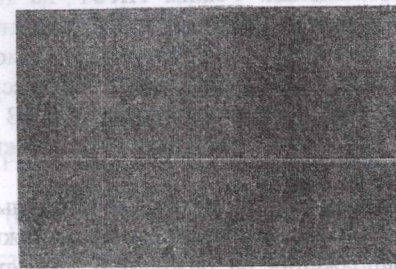


Рис.3. Положительная корона.  $U=18,5$  кВ,  $d=30$  мм.

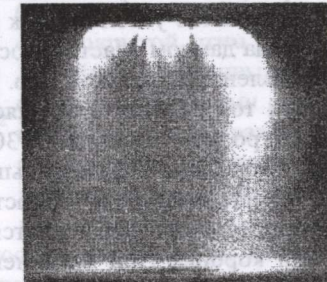


Рис.4. Коронный факельный разряд.  $U=20$  кВ. (Увеличено в 2,5 раза).

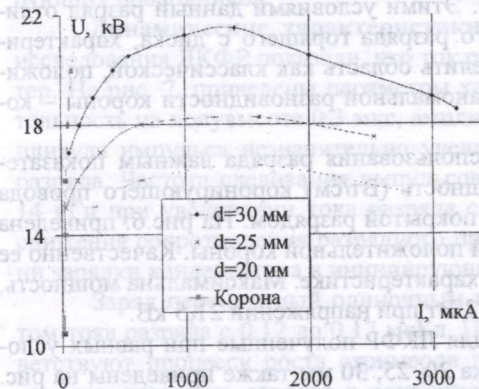


Рис.5. Вольтамперные характеристики положительной короны и ЛКФР при  $h = 1,1$  мм (для различных  $d$ ).

Во второй главе рассмотрены статические и динамические вольтамперные характеристики линейного коронного факельного разряда и вопросы, связанные с его устойчивостью.

Вольтамперные характеристики ЛКФР для различных межэлектродных расстояний и обычной положительной короны приведены на рис.5. Внешняя характеристика обычной положительной короны (размер разрядного промежутка  $d=30$  мм, зазор в иницирующем  $h=0$ ,

максимальный ток 135 мкА, напряжение 21,5 кВ.) при замкнутом разряднике, возрастающая, а ее вид соответствует классическому коронному разряду.

В случае линейного коронного факельного разряда зависимости тока от напряжения при  $h > 0$  коренным образом изменяются. На рис. 5 изображены ВАХ для ЛКФР горящего при различных размерах разрядного промежутка. ВАХ смещаются в низ при уменьшении  $d$  с 30 до 20 мм, что обусловлено увеличением напряженности поля в разряде. При токе разряда 1250 мкА возрастающая ветвь характеристики переходит в падающую, тем не менее, разряд остается стационарным во всем диапазоне напряжений горения. Оценка устойчивости ЛКФР по Кауфману подтверждает экспериментальные наблюдения. Режим ЛКФР на падающем участке устойчив, так как угол между касательными к характеристике на данном участке и осью тока меньше, чем угол между прямой сопротивления и той же осью. Характеристики показывают, что максимальный ток разряда составляет 3200 мкА при напряжении 18,5 кВ и межэлектродном расстоянии 30 мм. Для данных условий ток положительной короны в 52 раза меньше, чем ток ЛКФР.

Приведенные зависимости показывают, что линейный коронный факельный разряд формируется, минуя стадию классической, положительной короны. При увеличении напряжения на разрядном контуре, разряд либо не горит, либо зажигается внезапно и сразу заполняет весь разрядный промежуток. Увеличение тока разряда приводит к усилению интенсивности его свечения. Напряжение зажигания ЛКФР (15-17 кВ) определяется размерами разрядного промежутка  $d=20\div 30$  мм и зазором  $h$  в инициирующем разряднике. Этими условиями данный разряд отличается от коронного факельного разряда горящего с диска, характеристики которого позволяют выделить область как классической, положительной короны так и область аномальной разновидности короны — коронного факельного разряда.

Для технологического использования разряда важным показателем является его удельная мощность (Вт/см) коронирующего провода или мощность кВт/м<sup>2</sup> площади покрытой разрядом. На рис. 6. приведена зависимость мощности обычной положительной короны. Качественно ее ход аналогичен вольтамперной характеристике. Максимальная мощность, вложенная в разряд, составляет 3 Вт при напряжении 21,5 кВ.

Зависимости мощности для ЛКФР полученные при равных условиях для расстояний промежутка 20, 25, 30 мм также приведены на рис. 6. Максимальная мощность ЛКФР 60 Вт реализуется при напряжении 18,5 кВ и размерах разрядного промежутка 30 мм. Обратный ход зависимости обусловлен наличием падающей ветви вольтамперной

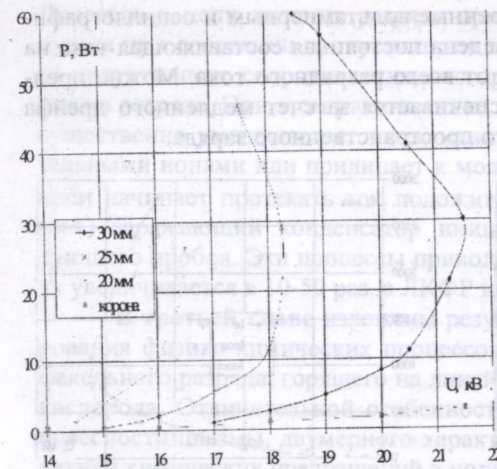


Рис. 6. Зависимость мощности положительной короны ( $d=30$  мм,  $h=0$  мм) и ЛКФР ( $d=20, 25, 30$  мм,  $h=1.1$  мм) от напряжения.

характеристики разряда. Простое сравнение зависимостей мощности для положительной короны и ЛКФР показывает, что в энергетическом отношении ЛКФР превосходит корону в 20 раз, хотя разряд горит при меньших напряжениях. Удельная мощность ЛКФР составляет до 2.7 Вт/см коронирующего провода диаметром 0,5 мм или 6 кВт/м<sup>2</sup> поверхности покрытой этим разрядом. Линейный коронный факел обладает большими преимуществами в практическом применении. Условием технологического использования данного разряда является его стационарность во времени и возможность заполнения им достаточно большого объема. Исследования показали, что сила тока не изменяется в течение длительных промежутков времени более 10 часов. Технически заполнение объема разрядом выполняется достаточно просто: между параллельными плоскостями устанавливается ряд параллельных коронирующих проводников.

**Динамические характеристики разряда.** Осциллографические исследования ЛКФР показали, что ток разряда носит импульсный характер. На рис. 7. приведены параметры характерного импульса тока: длительность на полувысоте 0,3 мкс, амплитуда 0,08 А. Длительность и амплитуда импульса незначительно увеличивается при возрастании тока разряда. Частота следования импульсов линейно возрастает с 10 Гц до 14 кГц при увеличении тока разряда с 5 до 2800 мкА за счет общего снижения сопротивления разрядного промежутка и, уменьшения времени зарядки конденсатора в инициирующем разряднике.

Заряд переносимый одиночным импульсом увеличивается с ростом тока разряда с 0,12 до 0,17 мкКл. Полагая, что импульсы тока соответствуют процессу роста стримеров в разрядном промежутке можно оценить плотность зарядов в одиночном стримере. При средней длине стримера 3,5 см она составляет величину порядка  $4.5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Детальное изучение протекающего тока разряда показывает, что наряду с импульсной составляющей в токе ЛКФР присутствует постоянная. На рис.

8. показаны ВАХ разряда, измеренные вольтамперным и осциллографическим способами. Там же приведена постоянная составляющая тока на долю, которой приходится 10% от всего разрядного тока. Можно предположить, что данный ток обеспечивается за счет медленного дрейфа положительных ионов объемного пространственного заряда.

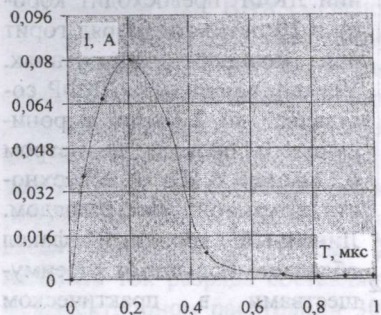


Рис. 7. Параметры импульса тока ЛКФР:  $d=30$  мм,  $h=0,5$  мм,  $U=20$  кВ.

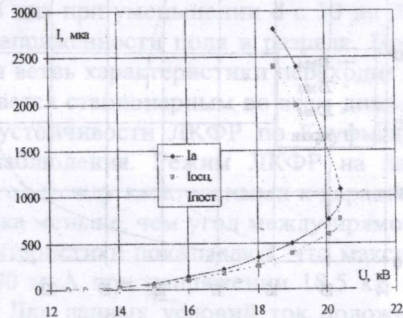


Рис. 8. ВАХ разряда измеренная двумя способами:  $d=30$  мм,  $h=0,5$  мм.

**Роль инициирующего разрядника.** При подаче высокого напряжения на коронирующий электрод вначале зажигается обычный коронный разряд. Он некоторое время заряжает катод (плоскость) и емкость  $C$ , подключенную параллельно разряднику. После достижения пробивного напряжения  $\sim 2,5$  кВ (зависящего от межэлектродного зазора), происходит искровой пробой этого промежутка. После чего напряжение на разряднике уменьшается до 0,8 кВ. Нулевых значений напряжения не наблюдается, так как сопротивление искрового канала не равно нулю и через канал протекает одновременно ток разряда конденсатора и основной ток ЛКФР. После погасания разряда конденсатор в разряднике вновь заряжается от 0,8 до 2,5 кВ и цикл разряда-заряда повторяется. Выявлено, что в период горения искры в разряднике напряжение на коронирующем электроде снижается вдвое относительно исходного значения. Это связано с тем, что в момент пробоя разрядника напряжение на катоде снижается до 0,8 кВ, а напряжение между коронирующим проводом и катодом возрастает импульсно на 1,7 кВ (с 19 до 20,7 кВ.). При импульсном скачке напряжения на фоне постоянной составляющей в разрядном промежутке происходит экспоненциальное размножение электронов в лавинах, которые переходят в стримеры и быстро увеличивают проводимость разрядного промежутка. Сила тока разряда за время 150-300 нс достигает максимального значения  $\sim 100$  мА.

Дроссель в цепи питания разряда при указанных длительностях импульса не в состоянии пропустить ток данной величины за счет большого индуктивного сопротивления, что приводит к уменьшению напряжения на разряде. При этом размножение электронов и развитие стримеров существенно уменьшается: часть электронов рекомбинирует с положительными ионами или прилипает к молекулам кислорода или озона, а в цепи начинает протекать ток положительной короны (величиной  $\sim 150$  мкА) заряжающий конденсатор инициирующего разрядника до следующего пробоя. Эти процессы приводят к тому, что средний ток разряда увеличивается в 10-50 раз, а ЛКФР не переходит в дугу или искру.

**В третьей главе** изложены результаты математического моделирования физико-химических процессов, протекающих в поле коронно-факельного разряда, горящего на линейном токопроводе в среде чистого кислорода. Отличительной особенностью модели является учет неравновесности плазмы, двумерного характера протекающих процессов, кинетики химических превращений в поле разряда.

Рассматривается коронирующий электрод с положительным потенциалом в виде длинной тонкой проволоки, расположенной параллельно плоскости заземленного электрода. Заданными считаются параметры нейтральной среды (температура, давление), напряжение на электродах, геометрия разрядного контура. В качестве изменяемых параметров разряда принимались межэлектродное расстояние  $1 \div 3$  см и подводимое напряжение  $10 \div 20$  кВ.

В основу математического описания физических процессов положены уравнения двухтемпературной многокомпонентной гидродинамики (С.И. Брагинский, Ю.П. Райзер, М. Митчнер, В.М. Лелевкин, В.М. Семенов), записанных в рамках диффузионного приближения. Предполагается, что протекающие процессы стационарные, распределение электронов по энергиям квазиравновесное, температура тяжелых компонентов плазмы (молекул, атомов, ионов) одинаковая, среда неподвижная, выполняются условия плоской симметрии. Пренебрегается излучением, вязкостью и термодиффузией плазмы. Локальное изменение концентрации частиц в поле разряда происходит за счет диффузии, дрейфа и химических реакций.

**Математическая модель задачи включает в себя уравнения непрерывности компонентов плазмы**

$$\nabla \cdot (n_k \vec{V}_k) = \sum_{ij} \xi_{ij}^k K_{ij}^k n_i n_j - \sum_{kj} \xi_{kj}^k K_{kj}^k n_k n_j,$$

баланса энергии электронов и тяжелых частиц:

$$\nabla \cdot \left( \frac{5}{2} k_B T_e n_e \vec{V}_e \right) = \vec{j}_e \vec{E} + \nabla \cdot (\lambda_e \nabla T_e) - \alpha (T_e - T) \pm \sum_{\gamma} K_{\gamma}^{kj} n_k n_j \varepsilon_{\gamma e},$$

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \alpha (T_e - T) \pm \sum_{\gamma} K_{\gamma}^{kj} n_k n_j \varepsilon_{\gamma n} = 0,$$

уравнение Пуассона и движения:

$$\nabla^2 (\varepsilon_0 \varphi) = \sum_k e_k n_k, \quad \vec{V}_k = \pm \mu_k \vec{E} - \frac{D_k}{n_k} \nabla n_k,$$

которые дополняются интегральным законом Ома, уравнениями состояния, непрерывности электрического тока, зависимостями коэффициентов переноса и скоростей химических реакций от параметров плазмы и замыкаются граничными условиями по всему контуру расчетной области.

При задании граничных условий полагается, что находящийся под положительным потенциалом коронирующий токопровод не эмитирует положительных ионов, а заземленная плоскость — электроны и отрицательно заряженные ионы; для нейтральных частиц используется условия непроницаемости; для температуры электронов — условия адиабатичности стенки. На внешних свободных границах расчетной области ставятся "мягкие" условия — отсутствие градиентов для всех искомых функций, положение границы выбирается на основе предварительных вычислительных экспериментов.

В состав кислородной плазмы включены молекулярные  $O_3$ ,  $O_2$ ,  $O_2^+$ , атомарные  $O$ , ионные  $O^-$ ,  $O_2^-$ ,  $O_2^+$  и электронные  $e$  компоненты, эволюция которых описывается 24 реакциями. Синтез озона осуществляется через диссоциацию молекулярного кислорода электронным ударом с последующей конверсией атомарного кислорода в реакции  $O + O_2 + O_2 \rightarrow O_3 + O_2$ , а также в реакциях ассоциативной рекомбинации молекулярных и атомарных ионов. Разрушение озона происходит как при электронной бомбардировке, так и в столкновениях с атомами. Основной реакцией размножения электронов принята ионизация молекулы  $O_2$  прямым электронным ударом. Образование отрицательных ионов происходит при низких энергиях электронов путем резонансного захвата электрона атомом или молекулой (Ю.П. Райзер., В.И. Гибалов). Константы скоростей химических реакций с участием электронов полагаются функциями  $f(T_e)$  или  $f(E/n)$ .

Коэффициенты переноса определяются в рамках элементарной кинетической теории с учетом различия температур электронов и тяжелых частиц:

$$\mu_k = \frac{e}{k_B T_k} D_k, \quad D_k = \frac{k_B T_k}{m_{kj} \nu_{kj}}, \quad \sigma_e = e \mu_e n_e = \frac{e^2 n_e}{m_e \nu_{em}}, \quad \lambda_e = \frac{5}{2} \frac{k_B^2 n_e T_e}{m_e \nu_{em}},$$

Для сечений рассеяния частиц на молекулах кислорода используются литературные данные, при взаимодействиях  $O_2^+ \leftrightarrow O_2$ ,  $O_2^- \leftrightarrow O_2$ ,

$O^- \leftrightarrow O$  учитывается резонансная перезарядка.

Дискретизация дифференциальных уравнений осуществляется методом контрольного объема на неравномерной сетке. Линеаризация источникового члена в уравнениях непрерывности проводится по схеме  $\dot{n}_k = R_k + S_k n_k$  с коэффициентом  $S_k < 0$  ( $R_k$  описывает процессы образования частиц,  $S_k n_k$  — гибели). Решение осуществляется итерационным методом с использованием прогонок с переменными направлениями. Для устойчивости решения применяется метод нижней релаксации.

Как следует из результатов расчета (рис. 9-12), вблизи сечения коронирующего токопровода реализуются сильно неоднородные электрические поля с напряженностью ~30-50 кВ/см, достигают высоких значений температура электронов 40-80 кК при сравнительно низкой температуре тяжелой компоненты плазмы ~350-400 К, концентрации частиц  $O_3 \sim 10^{16}-10^{17}$  см<sup>3</sup>,  $O \sim 10^{16}$  см<sup>3</sup>,  $e \sim 10^{11}-10^{12}$  см<sup>3</sup>,  $O_2^+ \sim O_2^- \sim 10^{12}-10^{13}$  см<sup>3</sup>. Сила тока в пересчете на всю пространственную область разряда составляет 30-100 мкА. Отмечено, что прилипание электронов к молекулам  $O_2$  является одним из основных каналов гибели электронов в поле разряда  $e < O_2^- \sim O_2^+ < O^-$ .

Изменения температуры электронов и продуктов химических реакций практически отслеживаются распределением напряженности электрического поля в разрядной области. В сильно неравновесной плазме ( $T_e \gg T$ ) процессы диссоциации и ионизации частиц происходят в основном при столкновениях с электронами и носят нетермический характер (Ю.В. Филиппов). Этим объясняется сравнительно высокая концентрация озона в поле коронного разряда, так как наличие "сверхравновесной" концентрации атомарного кислорода при нетермическом воздействии электронов на газ обеспечивает необходимое направление реакции  $O + O_2 + O_2 \rightarrow O_3 + O_2$  для образования озона. Реализуемость таких условий в коронно-факельном разряде делает перспективным его использование для синтеза озона в кислородосодержащих средах.



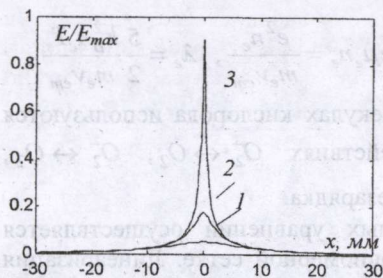


Рис. 9. Распределения  $E/E_{max}$  в сечениях  $y=10$  (1), 14 (2), 15 (3) мм,  $E_{max}=37$  кВ/см.

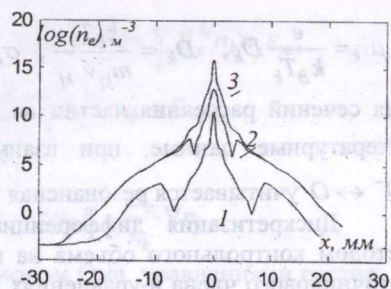


Рис. 10. Распределение концентрации электронов в сечениях  $y=10$  (1), 14 (2), 15 (3) мм.

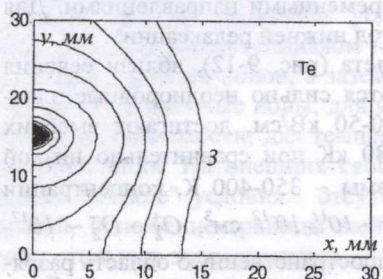


Рис. 11. Поле электронной температуры с шагом 2 кК при  $U=10$  кВ.

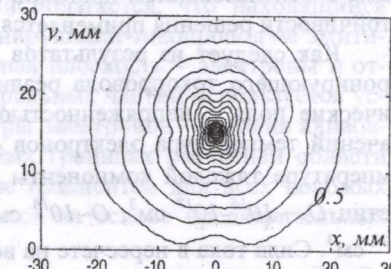


Рис. 12. Поле изолиний потенциала с шагом 0,5 кВ при  $U=10$  кВ.

Учет объемного заряда деформирует внешнюю область "лапласовского" поля, и в меньшей степени - внутреннюю. Ионизация нейтральных частиц локализована в ограниченной области вблизи коронирующего электрода, где имеется сильное поле. Из зоны ионизации во внешнюю область разряда движется поток положительных ионов, а размножение электронов идет по направлению к коронирующему токопроводу. Формируется слабо выраженная "шатровая" форма токопроводящей области. Образующийся во внешней зоне объемный заряд ослабляет поле вблизи коронирующего электрода, тормозит дальнейшее развитие процессов ионизации и, тем самым, локализует зону ионизации вблизи его поверхности. Перенос тока во внешней области разряда осуществляется в основном ионами, где их концентрация на несколько порядков превышает концентрацию электронов.

С уменьшением межэлектродного расстояния или с увеличением подводимого напряжения коронный разряд диффузно заполняет практи-

чески весь разрядный промежуток (аналог факельного разряда), происходит вынос активных процессов ионизации в направлении второго электрода. Для этих условий итерационное решение уравнений становится неустойчивым. В экспериментах это возможно может соответствовать искровому пробую разрядного промежутка.

В четвертой главе рассмотрены вопросы, связанные с синтезом озона в ЛКФР из воздуха или кислорода. Определены механизмы, влияющие на синтез и разложение окислителей (озона и перекиси водорода) в линейном коронном факельном разряде (ЛКФР), горящем в воздухе или азоте на поверхности воды. Показана эффективность обеззараживания проточной воды данным разрядом в сравнении с озонированием или хлорированием.

Активизирующая роль азота в синтезе перекиси водорода.

Исследования показали, что производительности установки по окислителям ( $O_3 + H_2O_2$ ) сложным образом зависит как от расхода воды,

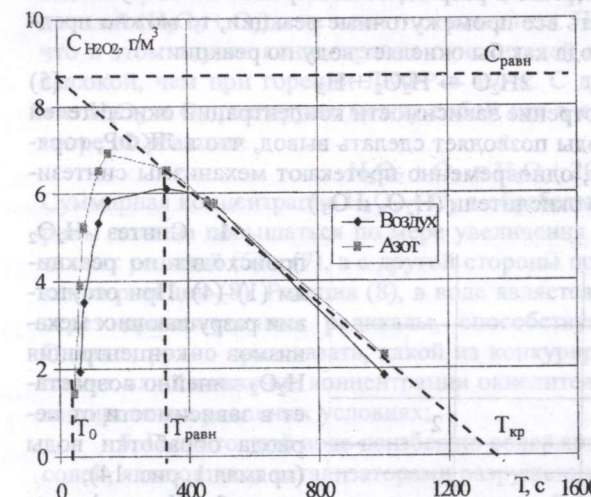


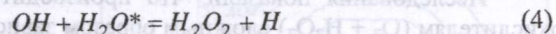
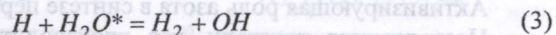
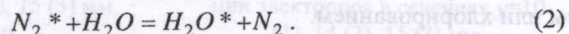
Рис. 13. Зависимости концентрации  $H_2O_2$  от периода обработки проточной воды.

так и от состава газа, в котором горит ЛКФР. Для всех исследуемых расходов воды концентрация окислителей в воде при горении ЛКФР в воздухе меньше, чем при горении разряда в азоте (рис. 13).

Для объяснения данных явлений рассмотрим механизмы, синтезирующие и разлагающие окислители. Известно, что азот стимулирует синтез озона. Как показывают исследования, азот способствует и синтезу

$H_2O_2$ . Известно, что для  $N_2$  область эффективного возбуждения составляет  $1,7 \div 3,5$  эВ, а сечение в максимуме достигает  $3 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>; для  $H_2O$  эти параметры соответственно равны  $5 \div 10$  эВ и  $6 \cdot 10^{-17}$  см<sup>2</sup>; для  $O_2$   $0,1 \div 1,5$  эВ и  $10^{-17}$  см<sup>2</sup>. Как видно из сравнения, область эффективного возбуждения  $N_2$  ближе к области эффективного возбуждения  $H_2O$ , чем у  $O_2$ .

Поэтому возбужденный  $N_2$  легче передает энергию молекулам  $H_2O$ , чем возбужденный  $O_2$ . Сечение в максимуме колебательного возбуждения электронным ударом у  $N_2$  в 30 раз больше чем у  $O_2$  и в 5 раз больше чем у  $H_2O$ . Содержание паров воды в воздухе или азоте при температуре проточной воды  $14^\circ C$ , составляет 10 г/кг воздуха или азота, или 1% по массе. Поэтому электроны в ЛКФР взаимодействуют преимущественно с азотом, а от возбужденного азота энергия переходит к парам воды, и способствует синтезу перекиси водорода. Предполагается, что в ЛКФР, горящем в азоте на проточную воду, происходят следующие реакции:



Азот переносит энергию в разряде от электронов к молекулам воды. Если не рассматривать все промежуточные реакции, то можно предположить, что в ЛКФР вода как бы окисляет воду по реакции:



Подробное рассмотрение зависимости концентрации окислителей от периода обработки воды позволяет сделать вывод, что в ЛКФР, горящем на проточную воду, одновременно протекают механизмы синтезирующие и разрушающие окислители ( $H_2O_2$  и  $O_3$ ):

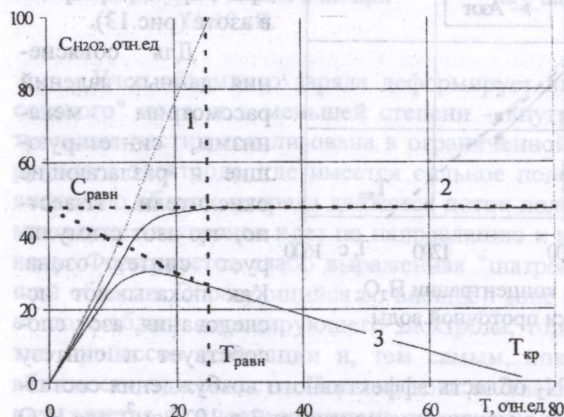


Рис. 14. Моделируемые зависимости концентрации  $H_2O_2$  от периода обработки проточной воды (в отн. единицах).

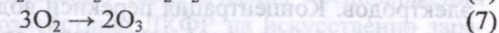
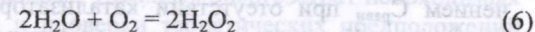
1. Синтез  $H_2O_2$  происходит по реакциям (1)–(4). При отсутствии разрушающих механизмов концентрация  $H_2O_2$  линейно возрастает в зависимости от периода обработки воды (прямая 1, рис. 14);

2. Ультрафиолетовое излучение, в разряде способствует фотохимическому разложению образовавшейся перекиси водорода. Концентрация  $H_2O_2$  по мере увеличения периода обработки воды

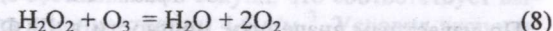
выходит на некий равновесный уровень  $C_{равн}$  (кривая 2, рис. 14). Модельные расчеты показывают, что не зависимо от периода выхода на равновесный уровень концентрация перекиси водорода  $C_{равн}$  в данный момент времени всегда оказывается примерно вдвое меньше чем в случае, если бы не было ее разрушения;

3. Концентрация  $H_2O_2$  после достижения максимума снижается (рис. 13) вследствие поступления продуктов эрозии электродов в обрабатываемую воду. Перекись водорода каталитически разрушается ионами металлов переменной валентности (Fe и Ni). Их концентрация линейно возрастает со временем, снижая значение равновесной концентрации  $H_2O_2$  после периода выхода на стационарный режим;

4. В разряде, горящем в воздухе на воду, кроме реакций (1)–(4), возможны следующие:



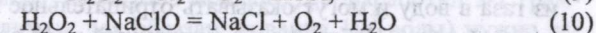
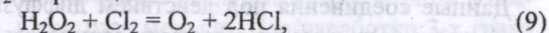
Йодометрический метод одновременно регистрирует сумму обоих окислителей ( $H_2O_2 + O_3$ ) и не может их разделить. Поэтому логично ожидать, что в этом случае концентрация окислителей должна получаться более высокой, чем при горении ЛКФР в азоте. С другой стороны известно, что  $H_2O_2$  и  $O_3$  реагируют между собой как в газовой фазе, так и в растворе по реакции:



Суммарная концентрация  $H_2O_2 + O_3$  в обрабатываемой воде с одной стороны должна повышаться по мере увеличения периода обработки воды за счет реакций (6) и (7), а с другой стороны понижаться по мере протекания реакции (8). Реакция (8), в воде является полезной, т.к. протекает через промежуточные радикалы, способствующие обеззараживанию. Однако трудно предсказать, какой из конкурирующих эффектов (повышение или понижение концентрации окислителей от времени) будет доминировать в реальных условиях;

5. В проточной воде неизбежно содержится некоторое количество солей, являющихся катализаторами разрушения  $H_2O_2$  и, даже при отсутствии эрозии электродов, часть образующейся  $H_2O_2$  будет каталитически разрушаться солями.

6. Водопроводная вода содержит в себе хлор или его соединения, которые реагируют с  $H_2O_2$  по реакциям:



7. Органические соединения, присутствующие в водопроводной воде, окисляются с образованием углекислого газа и воды. Поэтому механизмы 5, 6 и 7 протекают одновременно и приводят к тому, что зави-

симости концентрации окислителей от периода обработки воды (рис. 14), при их экстремальном полировании в начальный момент времени, не выходя из начала координат. Т.е. как минимум первые 35 с для  $N_2$  и 50 с для  $O_2$  горения ЛКФР все количество вырабатываемых окислителей реагирует по схемам механизмов 5, 6 и 7. Это условно говоря "период нулевой производительности"  $T_0$ . В период  $T \geq T_0$  нельзя утверждать, что вклад от механизмов 6 и 7, разрушающий окислители, уже полностью «выключается». Возможно, что в этот период наработка окислителей начинает превышать их распад.

Модельные расчеты показывают (рис. 14), что линейный участок изменения концентрации  $H_2O_2$  от периода обработки воды (кривая 3), экстраполированный в начальный момент времени можно считать значением  $C_{равн}$  при отсутствии катализатора, поступающего от эрозии электродов. Концентрация перекиси водорода при отсутствии катализатора и фотохимического разложения должна примерно вдвое превосходить значение равновесной концентрации в момент достижения  $T_{равн}$ . Поэтому скорость изменения концентрации  $H_2O_2$  в воде будет определяться выражение:

$$U \cong \frac{2C_{равн}}{T_{равн} - T_0}, \text{ [г/(м}^3 \cdot \text{с)]} \quad (11)$$

По известным значениям мощности в ЛКФР, скорости и объему воды протекающему через зону разряда за  $T_{равн}$ , определяется часовая производительность и удельные энергозатраты на синтез  $H_2O_2$ :

$$G_{H_2O_2} = 3600IU, \text{ [г/час]} \quad (12)$$

$$W = \frac{P}{G_{H_2O_2}}, \text{ [кВт} \cdot \text{ч/кг } H_2O_2] \quad (13)$$

Прямые измерения для  $T_{равн}$  при горении ЛКФР в азоте дают удельные энергозатраты 903 кВт\*ч/кг  $H_2O_2$ , а вычисления по указанной модели 318 кВт\*ч/кг  $H_2O_2$ . Для периода обработки 458 с для  $N_2$  прямые измерения дают 255 кВт\*ч/кг  $H_2O_2$ . Реальные энергозатраты будут заметно ниже.

**Побочные химические соединения, поступающие в воду.** При горении ЛКФР на поверхность воды наряду с перекисью водорода в зоне разряда возникают также различные соединения азота с кислородом. Данные соединения под действием диффузионных процессов поступают из газа в воду и могут оказывать отрицательное влияние на качество очищенной воды. Наблюдается медленный рост содержания данных соединений от времени горения разряда. Средние скорости увеличения концентраций азот содержащих соединения в воде при горении разряда равны:  $U_{NH_4^+} = 0,02$  мг/(л\*мин),  $U_{NO_2^-} = 0,05$  мг/(л\*мин),  $U_{NO_3^-} = 0,3$  мг/(л\*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. Вычисления дают следующие периоды:  $T_{(NH_4^+)} = 110$  мин,  $T_{(NO_2^-)} = 170$  мин,  $T_{(NO_3^-)} = 30$  мин. Превышение этих значений вызывает увеличение концентрации азотосодержащих соединений свыше ПДК. Исследования показали, что даже самый короткий период накопления ПДК для  $NO_3^-$  приблизительно на порядок превышает необходимое время для обеззараживания воды с помощью линейного коронного факельного разряда. Поэтому отрицательного влияния образующихся в разряде побочных соединений азота наблюдаться не будет.

**Обеззараживание воды линейным коронным факельным разрядом.** Для определения реальных удельных энергозатрат необходимых для обеззараживания воды и проверки теоретических предположений проведены исследования по воздействию ЛКФР на искусственно зараженную воду, представляющую собой смесь не хлорированной из скважины воды с введенными условно патогенными бактериями *E. Coli* концентрацией >2000 особей/мл. В исходную воду вводились ионы меди в количестве 0,5 мг/л, для каталитического разложения перекиси водорода и активизации процесса обеззараживания воды. Максимальный период нахождения воды в разряде составлял 600 секунд, что соответствует выработке перекиси водорода в концентрации 4,5 г/м<sup>3</sup>. Условия эксперимента определялись тем, что минимально необходимая для обеззараживания воды концентрация перекиси водорода составляет 3 г/м<sup>3</sup>. Результаты бактериологических анализов показывают, что двухминутное воздействие разряда на воду позволяет снизить количество кишечной палочки в ней практически до нуля. Это соответствует стандарту питьевой воды по содержанию бактерий. Удельный расход энергии на обеззараживание 1 м<sup>3</sup> воды составляет ~ 1 кВт\*час/м<sup>3</sup>.

Рассмотрим зависимости удельных энергозатрат на синтез перекиси водорода от времени её обработки разрядом в интервале 40-120 секунд (рис. 15). Видно, что зависимости имеют перегиб в области 60 секунд, который соответствует ранее изложенным механизмам синтеза и разложения перекиси. Удельные энергозатраты на синтез перекиси водорода (для разряда в азоте) соответствуют периоду полной стерилизации воды 120 сек и равны 300 кВт\*ч/кг. Реальные энергозатраты должны быть, по крайней мере, в три раза меньше. Для наработки 3-х граммов перекиси (необходимых для обеззараживания 1 м<sup>3</sup> воды) нужно затратить 0,3 кВт\*ч электроэнергии, что в три раза меньше чем затраты на обеззараживание искусственно зараженной воды. Данное расхождение определяется тем, что вода приготавливалась для экспериментов путем

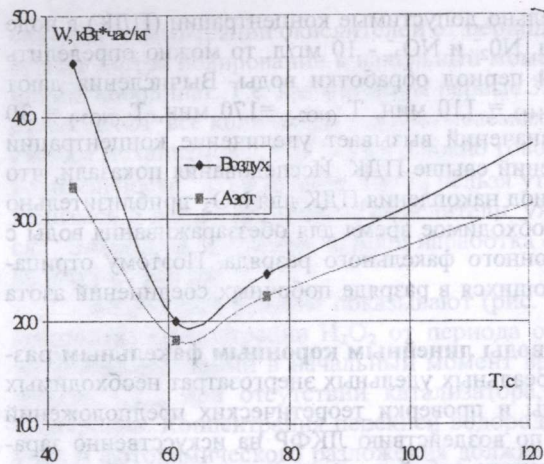


Рис. 15. Зависимость удельных энергозатрат на синтез перекиси водорода от времени.

растворения в воде мясопептонного бульона содержащего необходимое количество кишечной палочки. Концентрация бульона в воде составляла  $10 \text{ г/м}^3$ . Перекись водорода в данном случае расходовалась как на инактивацию кишечных палочек, так и на окисление органической составляющей бульона. Расход энергии для воды, не содержащей органической компоненты, будет меньше. Удельные энергозатраты на обеззараживание воды в несколько раз превышают

затраты по хлору или озону. Однако следует обратить внимание на то, что вклад от удельных энергозатрат в себестоимость производства окислителей не всегда является определяющим, преимущества получения окислителей непосредственно на месте потребления, позволяют утверждать, что предлагаемая технология, является перспективной и конкурирующей с существующими технологиями обеззараживания воды.

**Синтез озона в ЛКФР из воздуха.** По полученным зависимостям концентрации озона и удельных энергозатрат от напряжения (рис. 16.) для разряда в воздухе, можно определить области экономически приемлемых расходов воздуха через озонатор на ЛКФР и напряжения на разрядном контуре. Так как промышленные озонаторы работают в интервале удельных энергозатрат  $20\text{--}35 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кгO}_3$ , то из рис. 16 видно, что генерация озона в ЛКФР может производиться с аналогичными энергозатратами. При этом экономически приемлемая удельная мощность находится в интервале  $10\text{--}35 \text{ Вт/м}$ , а удельная производительность составят  $0,1\text{--}0,9 \text{ г/(м}^3\cdot\text{ч)}$  коронирующего провода в интервале напряжений  $15\text{--}18 \text{ кВ}$ . Концентрация озона достигает до  $1 \text{ г/м}^3$ . Из рис. 16 также видно, что все расходы, кроме расхода  $0,037 \text{ м}^3/\text{ч}$ , укладываются практически на одну линию. Для каждого расхода воздуха существует свое оптимальное напряжение, при котором генерация озона происходит с экономически приемлемыми энергозатратами. Обобщенная кинетическая за-

висимость для синтеза озона в ЛКФР показывает, что при любых межэлектродных расстояниях нет смысла делать большие энерговыклады в озонируемый газ, т. к. затраты энергии возрастают существенно, а концентрация озона растет слабо.

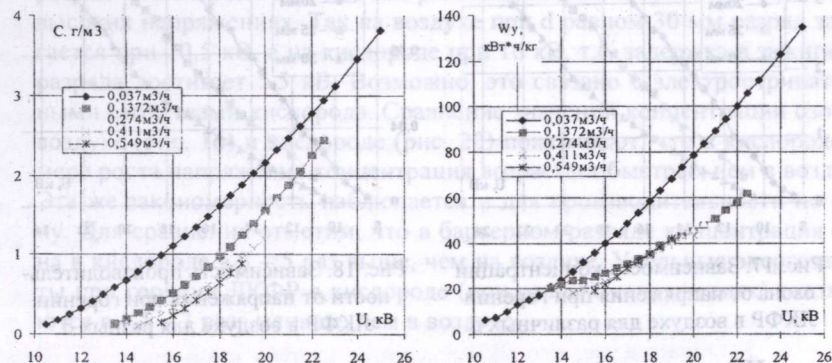


Рис. 16. Зависимость концентрации озона и удельных энергозатрат на его синтез от напряжения, для различных расходов газа.

**Влияние межэлектродного расстояния на синтез озона в ЛКФР из воздуха.** Размеры разрядного промежутка оказывают существенное влияние на все параметры разряда. Рассмотрим горение разряда на воздухе, прокачиваемого через зону разряда с расходом  $0,037 \text{ м}^3/\text{ч}$  при различных размерах разрядного промежутка ( $20, 25$  и  $30 \text{ мм}$ ). Зазор в разряднике равен  $0,4 \text{ мм}$ .

Наибольший ток и наибольшая мощность разряда (при одинаковом напряжении на проводе) достигаются при меньших межэлектродных расстояниях. При этом увеличение расстояния на каждые  $5 \text{ мм}$  сопровождается в среднем примерно двухкратным сокращением, как силы тока, так и мощности разряда.

Из рис. 17 и рис. 18 видно, что наибольшие концентрации и производительности по озону достигаются при межэлектродном расстоянии в  $20 \text{ мм}$ . Однако увеличение межэлектродного расстояния на каждые  $5 \text{ мм}$  сопровождается примерно полутора кратным сокращением концентрации озона и производительности лабораторной установки.

С точки зрения достижения максимальной мощности и концентрации озона в единице объема занятого разрядом необходимо ближе сводить электроды. Ограничением сближения электродов (ближе, чем  $20 \text{ мм}$ ) является усиление неустойчивости горения, когда разряд легко

срывается в дугу или искру. Максимальная удельная мощность, достигает 6 Вт/м провода.

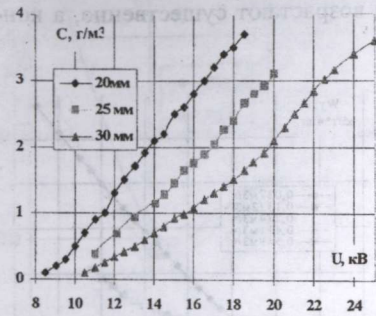


Рис. 17. Зависимость концентрации озона от напряжения при горении ЛКФР в воздухе для различных  $d$ .

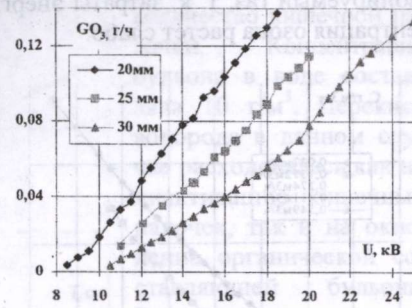


Рис. 18. Зависимость производительности от напряжения при горении ЛКФР в воздухе для разных  $d$ .

Из зависимости удельных энергозатрат идущих на синтез озона от напряжения (рис. 19.) следует, что максимальные удельные энергозатраты наблюдаются именно при минимальных межэлектродных расстояниях. При этом, при напряжениях, близких к напряжению пробоя межэлектродного промежутка. С точки зрения энергозатрат на синтеза озона, большие промежутки имеют преимущества. Вблизи напряжения зажигания разряда согласно рис. 19 наблюдаются наименьшие удельные энергозатраты близкие к термодинамическому пределу образования озона. Здесь весь синтезируемый озон выносятся из зоны разряда без его разрушения. Поэтому с точки зрения экономии энергии синтез озона необходимо проводить при напряжениях вблизи зажигания ЛКФР. Для достижения желаемой произ-

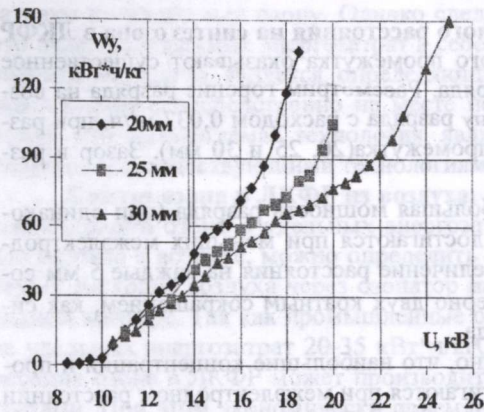


Рис. 19. Зависимость энергозатрат от напряжения. ЛКФР в воздухе при различных  $d$ .

водительности и концентрации необходимо увеличивать габариты разрядного блока и период нахождения воздуха в зоне разряда.

Синтез озона в ЛКФР из кислорода. На качественном уровне закономерности, проявляющиеся при горении разряда в воздухе, имеют место и при горении разряда в кислороде. По сравнению с воздухом разряд в кислороде при прочих равных условиях зажигается при более высоких напряжениях. Так на воздухе при  $d$  равном 30 мм разряд зажигается при 10,5 кВ, а на кислороде при 16 кВ, т.е. задержка в зажигании разряда достигает 5,5 кВ. Возможно, это связано с электроотрицательными свойствами кислорода. Сравнение значений концентрации озона в воздухе (рис. 16) и кислороде (рис. 20) показывают, что в кислороде по мере роста напряжения концентрация возрастает быстрее, чем в воздухе. Эта же закономерность наблюдается и для производительности по озону. Для сравнения отметим, что в барьерном разряде концентрация озона в кислороде в 3 – 5 раз выше, чем на воздухе. Удельные энергозатраты при горении ЛКФР в кислороде (при равных напряжениях) оказываются в 1,5 – 3 раза меньше, чем в воздухе.

Из зависимости удельных энергозатрат идущих на синтез озона от напряжения (рис. 19.) следует, что максимальные удельные энергозатраты наблюдаются именно при минимальных межэлектродных расстояниях. При этом, при напряжениях, близких к напряжению пробоя межэлектродного промежутка. С точки зрения энергозатрат на синтеза озона, большие промежутки имеют преимущества. Вблизи напряжения зажигания разряда согласно рис. 19 наблюдаются наименьшие удельные энергозатраты близкие к термодинамическому пределу образования озона. Здесь весь синтезируемый озон выносятся из зоны разряда без его разрушения. Поэтому с точки зрения экономии энергии синтез озона необходимо проводить при напряжениях вблизи зажигания ЛКФР. Для достижения желаемой произ-

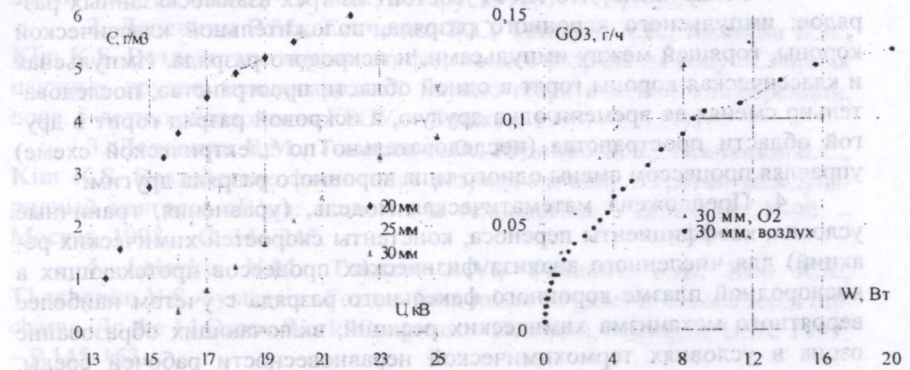


Рис. 20. Зависимость концентрации озона от напряжения для различных  $d$ . Разряд в кислороде.

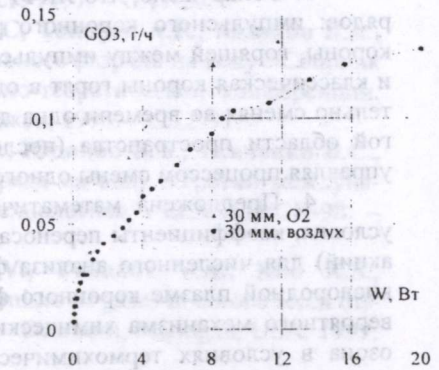


Рис. 21. Зависимость производительности озонатора, от мощности ЛКФР горящем в кислороде или в воздухе.

Для оценки параметров разряда, горящего в воздухе и кислороде, сравним зависимости производительности по синтезу озона от мощности, вкладываемой в разряд (рис. 21). Видно, что при равных мощностях, межэлектродных расстояниях и расходах газа производительность на кислороде примерно в полтора раза превышает производительность на воздухе. Для концентрации озона наблюдается аналогичная зависимость. Оптимальное значение удельной мощности в кислороде 10 Вт/м

коронирующего проволоча. При этом концентрация озона составляет 2 – 4 г/м<sup>3</sup>, а удельная производительность 0,2 – 0,45 г/ч на метр коронирующего провода.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получен новый вид коронного разряда - линейный коронный факельный разряд при напряжениях горения 10-25 кВ. Разряд стационарен во времени и может быть реализован при самых различных конфигурациях разрядного контура (проводник или острие над плоскостью, проводник в цилиндре, два и более параллельных проводника и др.).

2. Установлено, что для зажигания ЛКФР в разрядную цепь необходимо вводить инициирующий разрядник. Это позволяет наложить на постоянное напряжение разряда импульсы длительностью ~200 нс с амплитудой в максимуме 500- 2000 В и частотой 10-15000 гц. Основной ток разряда находится в импульсной составляющей, а 10% тока приходится на постоянную составляющую.

3. Обнаружено, что ЛКФР состоит из трех взаимосвязанных разрядов: импульсного коронного разряда, положительной классической короны, горящей между импульсами, и искрового разряда. Импульсная и классическая короны горят в одной области пространства, последовательно сменяя во времени одна другую, а искровой разряд горит в другой области пространства (последовательно по электрической схеме) управляя процессом смены одного типа коронного разряда другим.

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

5. Отмечено, что при обеззараживании воды линейным коронным факельным разрядом протекает ряд конкурирующих механизмов синтеза и разрушения перекиси водорода и озона. Основная реакция получения перекиси водорода протекает с участием колебательно возбужденных молекул азота. Разрушение перекиси водорода происходит в результате фотохимических реакций, при взаимодействии с озоном, хлором, ионами металлов переменной валентности. Потери перекиси водо-

рода происходят при окислении органических соединений присутствующих в воде. В результате плазмохимических реакций из зоны разряда в воду поступают азотосодержащие соединения, регистрируемые как ионы аммония, азотной и азотистой кислот. За время необходимое для обеззараживания воды их содержание не превышает предельно допустимых концентраций. Удельные энергозатраты на обеззараживание воды линейным коронным факельным разрядом составляют величину ~1 кВт\*ч/м<sup>3</sup>. Изменяя параметры ЛКФР генерацию озона в нем можно производить как из воздуха так и кислорода с энергозатратами не выше принятых в промышленности, т.е. 25 – 35 кВт\*ч/кг озона.

Основные результаты исследований опубликованы в следующих работах:

1. 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.

2. Лелевкин В.М., Ткаченко 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.

3. 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.

4. Lelevkin 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Kim K.S., Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А. Линейный коронный факельный разряд. Сборник научных трудов.

Выпуск 3 /Кыргызско-Российский Славянский университет. – Бишкек, 2000. – С. 23-31.

9. Kim K.S., Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А., Синтез озона в линейном коронном факельном разряде из кислорода и воздуха. Сборник научных трудов. Выпуск 3 /Кыргызско-Российский Славянский университет. – Бишкек, 2000. – С. 8-18.

10. Kim K.S., Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А. Взаимодействие линейного коронного факельного разряда с водой. Сборник научных трудов. Выпуск 3 /Кыргызско-Российский Славянский университет. – Бишкек, 2000. – С.37-48.

11. Kim K.S., Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А. Моделирование характеристик коронного разряда, горящего на линейном токопроводе. Сборник научных трудов. Выпуск 3 /Кыргызско-Российский Славянский университет. – Бишкек, 2000. – С. 59-71.

7/12  
7/10  
1/11

Подписано к печати 10.11.00. Формат 60×84 1/16.

Печать офсетная. Объем 1,75 п.л.

Тираж 100 экз. Заказ 197.

Издательство Славянского университета

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