

## 2 Экспериментальное изучение процесса инициирования плазмы в водной среде

### 2.1 Методика исследования

Разрабатывая методику исследования процесса возбуждения плазмы в водных растворах, мы исходили из опыта работы экспериментальной установки Вачаева А.В., а также приобретенного нами ранее собственного опыта. Способ получения плазмы заключается в подаче постоянного напряжения величиной 300-600В от батареи силовых конденсаторов к металлическим электродам, расположенным в водном растворе. При этом процессы электростатического пробоя разрядного промежутка и возникновения дугового разряда, характерные для электрического взрыва в жидкости, должны быть исключены.

По нашим представлениям процесс происходит следующим образом. Благодаря малому размеру иницирующих электродов (небольшой площади их поверхности) при подаче напряжения величиной несколько сотен вольт удельная плотность тока электролиза воды быстро достигает критической величины. При этом поверхность экранируется образующимся газом, что еще более увеличивает плотность тока. Напряженность электрического поля в тонкой газовой прослойке электрод-электролит достигает величины, достаточной для ионизации выделяющегося газа. Таким образом, один из электродов окружается плазменной оболочкой. Это первый этап процесса. В методическом плане его изучение не вызывает особых затруднений.

Второй этап процесса заключается в сложном взаимодействии крайне неравновесной электродной плазмы с электростатическим полем второго электрода, а также с магнитным полем тока, протекающего через нее и, наконец, с окружающей водой. В результате этого взаимодействия между иницирующими электродами может сформироваться автономное плазменное образование со столь ценными для нас свойствами. Это многократно подтверждено как нашими экспериментами, так и работами Вачаева А.В.. В данном случае мы имеем дело с объектом, неизвестной на сей день физической природы, что весьма затрудняет выбор методологических подходов для его исследования.

Для того чтобы выделить первый этап, достаточно размещать второй электрод на удалении от первого, а поверхность его должна превышать величину поверхности первого электрода, по крайней мере, в десять раз. Первое условие уменьшает напряженность электрического поля и не позволяет «вытащить» плазму с поверхности электрода. Второе условие облегчает достижение критической плотности тока электролиза, даже при

интегрально малой величине тока. Особенно это имеет значение при изучении электролитов с концентрацией ионообразующего вещества менее 0,05М, поскольку они имеют значительное сопротивление. Для повышения производительности и достоверности измерений можно перейти с постоянного тока на пульсирующий однополярный ток. Тогда на осциллограмме ток-напряжение можно будет наблюдать последовательно с периодом 10мс процесс зарождения, существования и исчезновения электродной плазмы.

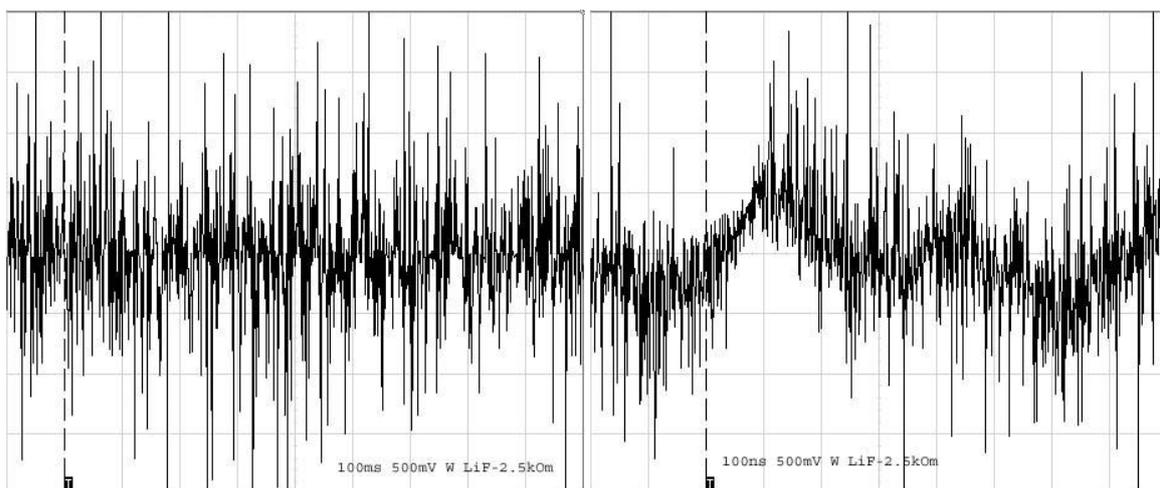
Ранее нами было установлено, что электродная плазма, особенно катодная, является мощным источником электромагнитного излучения. В связи с этим, методика проведения экспериментов была дополнена регистрацией спектра излучения плазмы в радиочастотном диапазоне.

Поскольку второй этап процесса не может быть методически выделен самостоятельно, будем изучать его в комплексе с первым. При этом рассмотрим вопросы предварительной фокусировки плазмы: геометрия электродов, магнитное обжатие. Кроме того, возможно влияние на процесс газообразных продуктов электролиза воды. Следует попытаться локализовать их в пространстве между электродами.

## 2.2 Катодная плазма

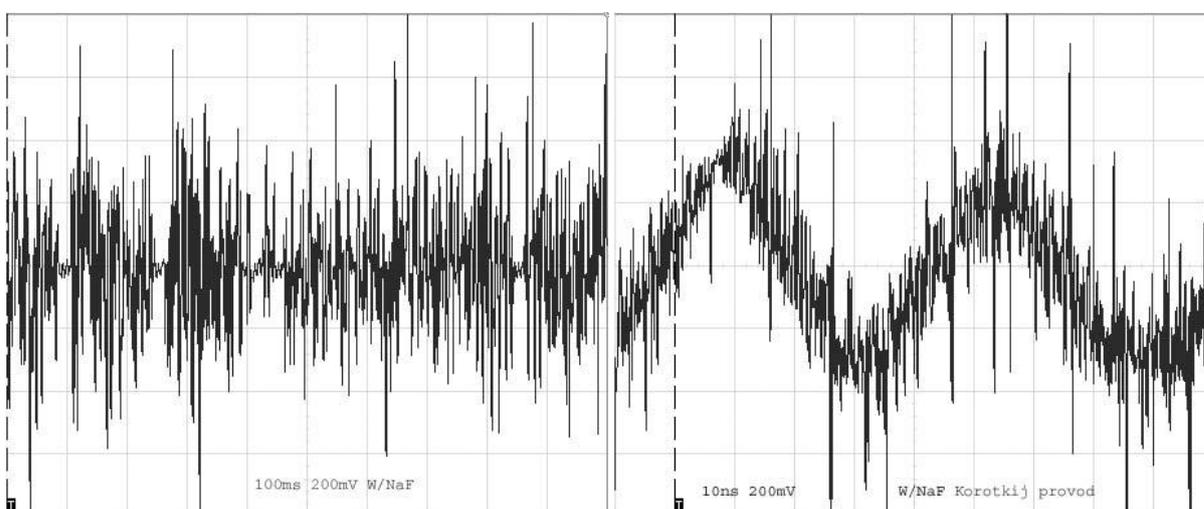
Опыты проводили в пластиковом прозрачном стакане, заполненном на  $\frac{3}{4}$  высоты электролитом. Внутри стакана размещался анод в виде кольца, изготовленного из нержавеющей стали. Катод, выполненный из заостренного вольфрамового стержня диаметром 1,5мм, был закреплен в держателе штатива и касался острием поверхности электролита. Источник питания позволял плавно изменять напряжение на ячейке в пределах 0-600В при токе до 10А. Напряжение и ток на ячейке регистрировали стрелочными приборами и двухканальным цифровым запоминающим осциллографом марки АСК-3106. Токовый сигнал снимался с безындукционного шунта ( $R=1\text{Ом}$ ). По ходу эксперимента осциллограммы записывались в память компьютера. Кроме того, на расстоянии один метр от ячейки был установлен широкополосный детекторный приемник со стрелочным прибором. Он использовался как индикатор поля.

В качестве электролита применяли растворы фторидов лития или натрия а также гидроокись лития в дистиллированной воде с удельным сопротивлением  $\rho=22\text{КОм}\cdot\text{м}$ . Осциллограммы катодного тока приведены на рис. 2.1.



a

b



c

d

a – LiF, 100ms, 500mA; b – LiF, 20ns, 500mA;  
 c – NaF, 100ms, 200mA; d – NaF, 20ns, 200mA.

Рисунок 2.1. Осциллограммы тока плазменного катода

Результаты опытов показали влияние на процесс состава электролита. При использовании фторида лития напряжение на ячейке составляло около 360В, ток – 3,5мА, индикатор поля «зашкаливал» (более 100%). В то же время, для фторида натрия напряжение не превышало 200В, а постоянная составляющая тока ячейки была в пределах 20-25мА, индикатор поля давал значения 50-70%. То же самое мы наблюдаем по амплитуде сигнала на рисунке (верхние осциллограммы сняты с чувствительностью 0,5А/дел., а нижние – 0,2А/дел.). Для гидроксиды лития были получены результаты, сходные с фторидом лития, поэтому они не были представлены на рисунке. Во всех

экспериментах температура острия вольфрамового катода по визуальной оценке составляла около  $1000^{\circ}\text{C}$ , окисление вольфрама не происходило, благодаря потоку отходящего водорода.

В экспериментах с фторидом лития при помощи анализатора спектра GPS-810 была проведена регистрация спектра излучения катодной плазмы в диапазоне частот 10-800МГц. Результаты измерений представлены на рис. 2.2.

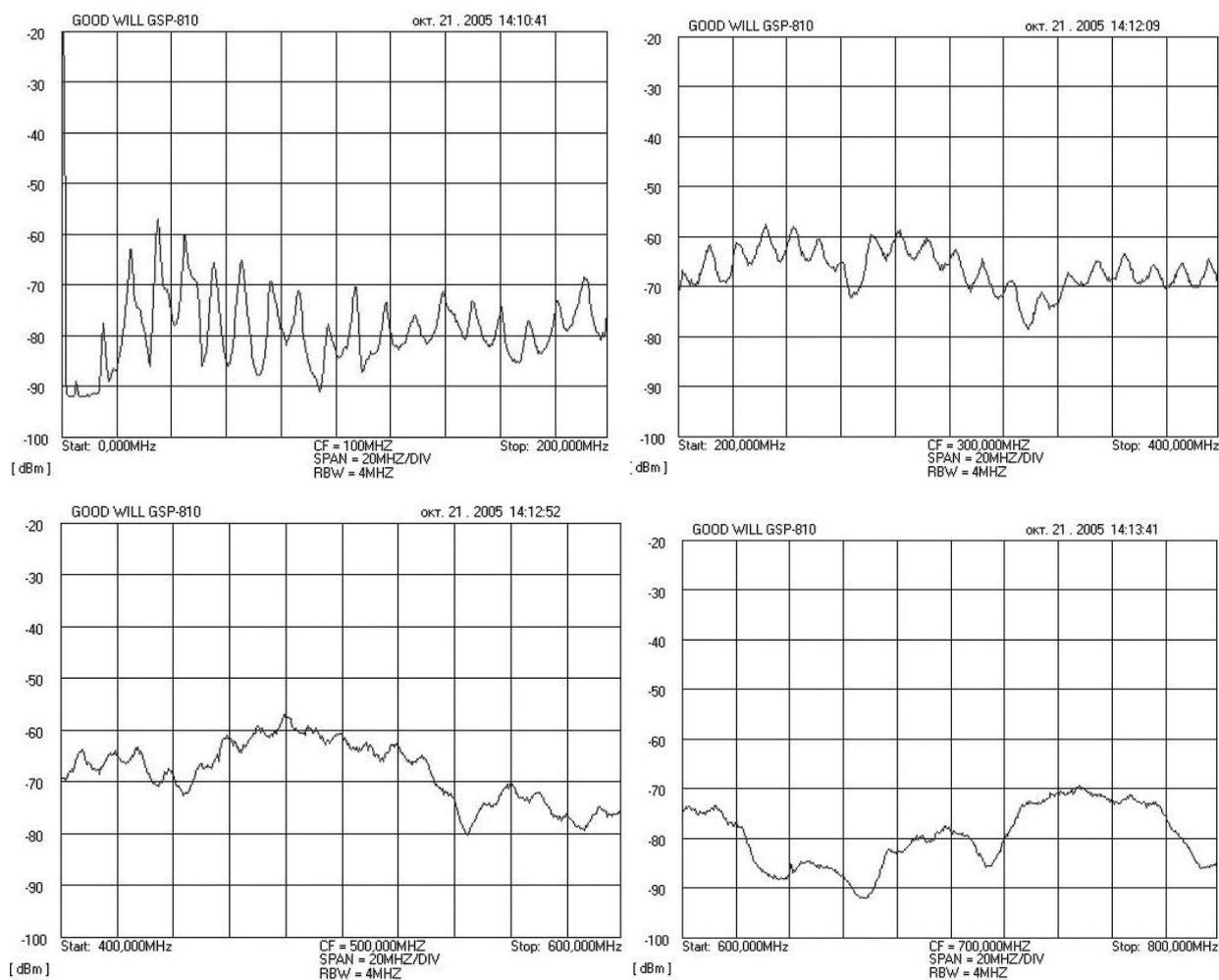


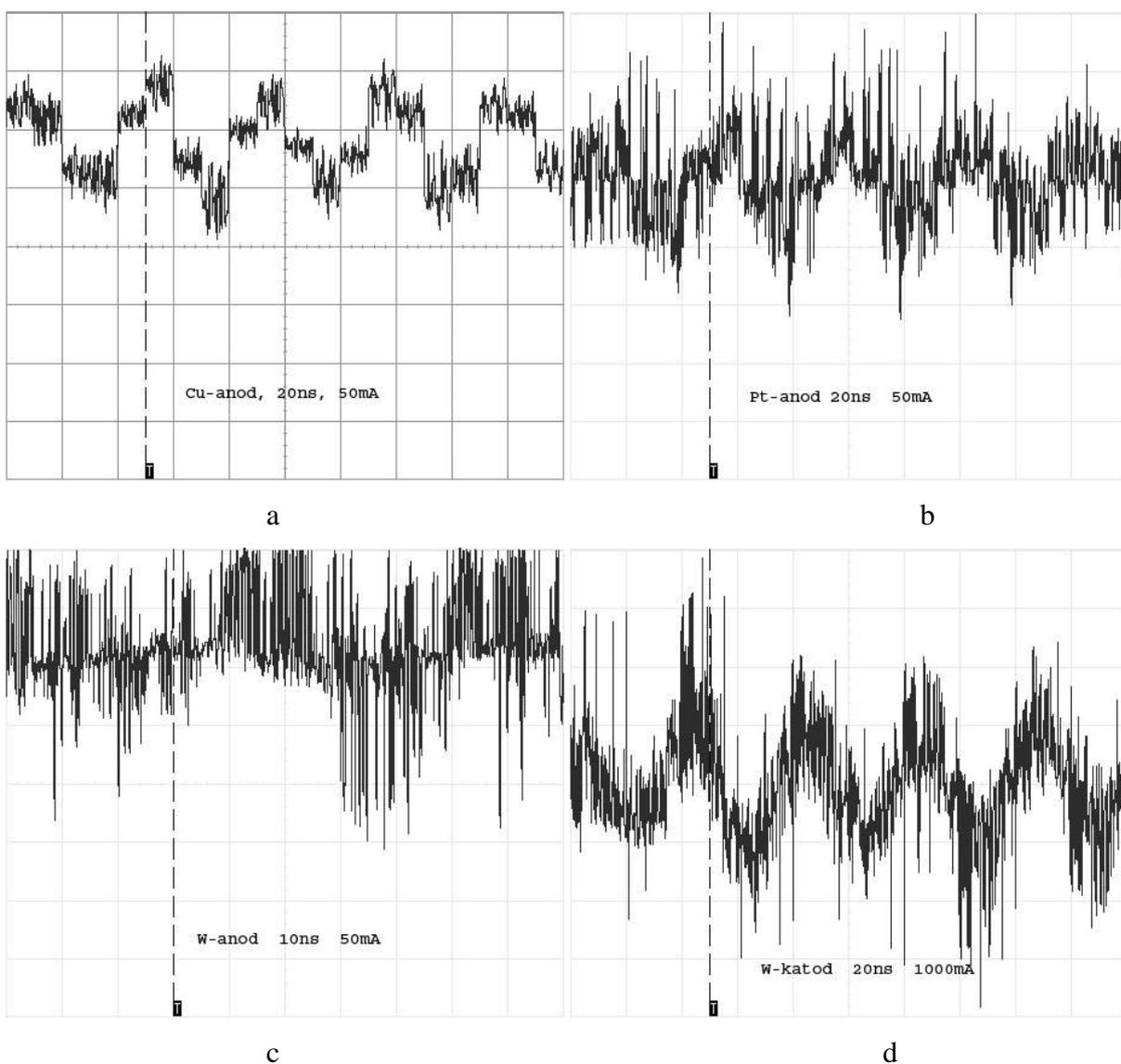
Рисунок 2.2. Спектр излучения катодной плазмы в диапазоне частот 10-800МГц

Периодические изменения амплитуды, особенно заметные до частоты 400МГц, возможно, несут некоторую информацию о процессах, происходящих в плазме. С другой стороны, они могут быть следствием резонанса на близко расположенных металлических деталях, подвергнутых ударному возбуждению.

Таким образом, как мы и предполагали, для плазменного электролиза на катоде важна природа катионов электролита. В данном случае предпочтение по всем параметрам следует отдать литию, хотя потенциалы его ионизации несколько выше, чем у натрия.

### 2.3 Анодная плазма

Эксперименты проводились по методике, описанной в предыдущем разделе. В качестве электролита был использован раствор буры ( $\rho=15\text{КОм}\cdot\text{м}$ ), полярность питающего напряжения была изменена на обратную, кроме того, материалом анода, кроме вольфрама, служили медь и платина. Для возбуждения анодной плазмы требуются значительно более высокие плотности тока, по сравнению с катодной. Поэтому, была повышена концентрация электролита и увеличено напряжение на ячейке до 500-600В. Осциллограммы тока плазменного анода для разных материалов приведены на рис. 2.3а,б,с. Для сравнения, на рис. 2.3д, показан ток плазменного катода из вольфрама.



a - Cu-анод, 20ns, 50mA; b – Pt-анод, 20ns, 50mA;  
c – W-анод, 10ns, 50mA; d – W- катод, 20ns, 1000mA

### Рисунок 2.3 Осциллограммы тока ячейки

Очевидно, что амплитудное значение переменной составляющей тока плазменного анода не превышает значения 100-150мА, при постоянной составляющей той же величины. Существенного влияния материала анода на процесс обнаружено не было. Для сравнения в этих же опытах на вольфрамовом электроде была изменена полярность питающего напряжения (рис. 2.3d). Среднее значение амплитуда переменной составляющей катода увеличилось при этом до 2А (более чем в 10 раз).

Спектр излучения анодной плазмы приведен на рис. 2.4. По сравнению со спектром излучения катодной плазмы он занимает более узкую полосу (до 50МГц) и имеет меньшую интенсивность. Периодические изменения интенсивности с частотой, столь характерные для катодного процесса, в данном случае не зарегистрированы.



Рисунок 2.4 Спектр излучения анодной плазмы в диапазоне 0-50МГц

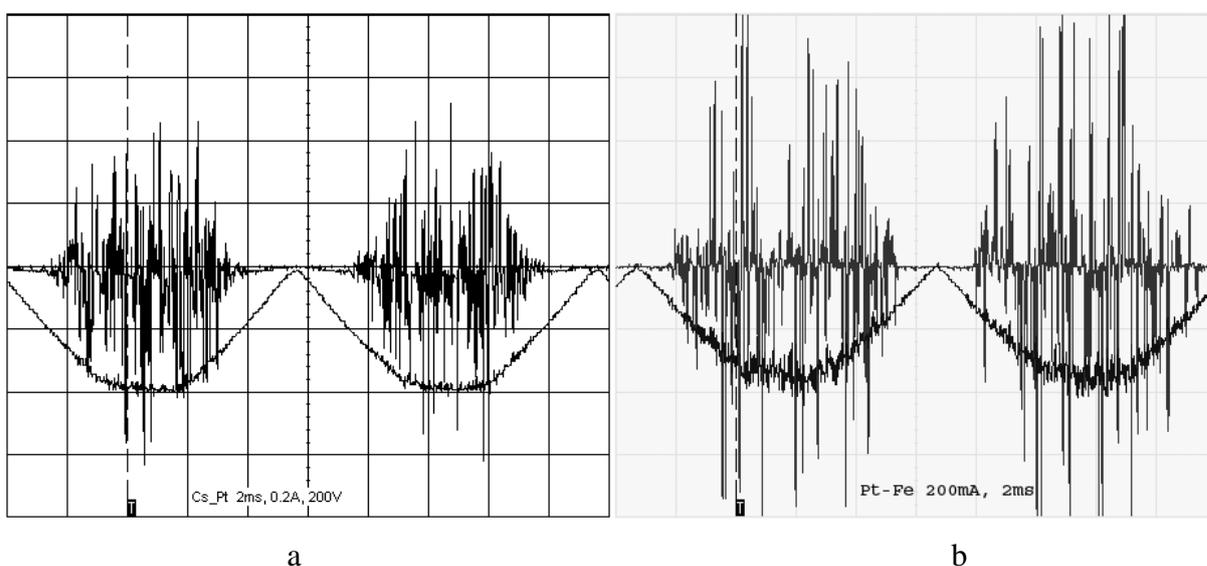
Полученные результаты на первый взгляд склоняют нас отдать предпочтение катодной плазме, как инструменту для возбуждения необходимого нам плазменного образования. Однако, основная часть энергии ее отдается электроду, разогревая даже вольфрам до плавления (при потреблении от источника питания 2-5Вт). Анодная же

плазма, потребляя от источника питания 60-90Вт, практически не нагревает электрод. Возможно, что в этом случае энергия плазмы передается электролиту, что может изменить его свойства, и создать условия для формирования плазмоида.

#### 2.4 Возбуждение плазмы пульсирующим током

Методика проведения этих опытов отличается от описанной ранее применением источника питания электролитической ячейки, не содержащего сглаживающих конденсаторов. Как и ранее источник содержал регулирующий трансформатор (0-250В), повышающий разделительный трансформатор 220/380В и диодный мостовой выпрямитель. Пульсирующее однополярное напряжение с частотой 100Гц подавалось непосредственно на ячейку. Изменяя амплитуду напряжения в пределах 100-600В, мы наблюдали в течение каждого полупериода сетевого напряжения зарождение, существование и исчезновение электродной плазмы.

В качестве материала активного электрода, на котором образуется плазма, была использована платина. Электролитом были водные растворы  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{LiF}$ ,  $\text{CsI}$ . Осциллограммы тока и напряжения, полученные в этих экспериментах, иллюстрируют рисунки 2.5 и 2.6.

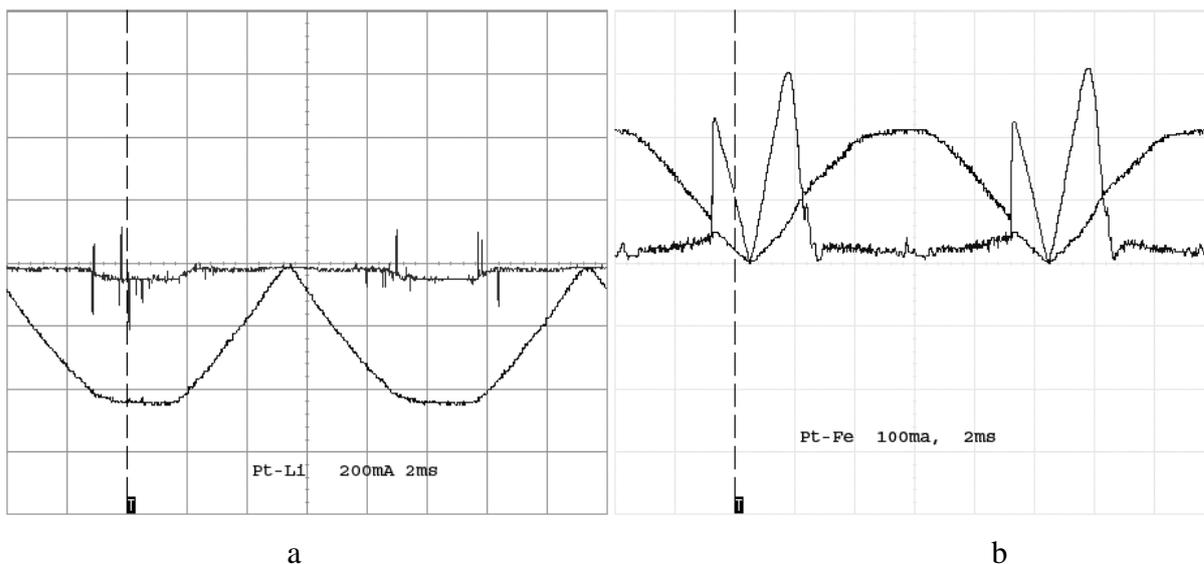


а –  $\text{CsI}$ , 2ms, 200mA, 200V; б –  $\text{FeCl}_3$ , 2ms, 200mA, 200V

Рисунок 2.5 Осциллограммы тока и напряжения для цезия и железа

На рисунке 2.5а можно различить токи возбуждения и погасания катодной плазмы в цезиевом электролите. Они одинаковы и равны примерно 20mA. При этом напряжение зажигания составляет 220В, а погасания – 180В. Для трехвалентного железа (рис. 2.5б) токи менее 10mA, а напряжения зажигания и погасания соответственно 130В и 100В.

Если повышать напряжение на ячейке с электролитом щелочного металла более 400В, то излучение плазмы в оптическом диапазоне смещается из видимого участка спектра в ультрафиолетовый. При этом платиновый катод раскаляется до температуры 1200-1300°C, угрожая оплавлением. Амплитуда тока переменной составляющей для натрия и цезия интегрально возрастает (хотя на осциллограммах видны паузы генерации высокочастотного тока на максимальном напряжении питания), а для лития падает практически до нуля (рис. 2.6а). При этом постоянная составляющая тока начинает превышать ток зажигания в 3 раза, достигая 60мА.



a – LiF, 2ms, 200mA, 200V; b – FeCl<sub>3</sub>, 2ms, 100mA, 200V (анодная плазма)

Рисунок 2.6 Осциллограммы тока и напряжения для лития и железа

На рис. 2.6b проиллюстрирован анодный процесс в электролите из хлорного железа. Здесь хорошо видна разница токов зажигания и погасания плазмы – 300мА и 230мА (соответственно напряжение 220В и 160В). Кроме того, хорошо заметна отрицательная вольт-амперная характеристика плазмы – ток падает по мере повышения напряжения.

Если проследить по времени ток на участках зажигания и погасания плазмы, то можно увидеть, что процесс зажигания растянут почти на миллисекунду, в то время как погасание происходит почти мгновенно.

## 2.5 Взаимодействие плазмы с полем второго иницирующего электрода

Методика экспериментов заключалась в подаче напряжения на два медных электрода, горизонтально расположенные в воде на расстоянии 1,5-5мм. Активный электрод имел меньшую поверхность контакта с электролитом. В качестве источника тока использовалась батарея силовых конденсаторов емкостью 760 мкФ, заряженных до

напряжения 300-600В. Электролитом являлась водопроводная вода с малыми добавками солей щелочных металлов. Проводимость ее должна была удовлетворять двум противоречивым требованиям. Относительно малые значения удельного сопротивления (20-30кОм·м) облегчают образование плазмы на электроде, но при этом практически все падение напряжения сосредоточено в электродной плазме. Иными словами величина «вытягивающего» поля очень мала. Если же использовать воду без добавок (90-100кОм·м), то затрудняется процесс образования электродной плазмы, поскольку мала плотность тока на электроде. Приходилось придерживаться средних значений удельного сопротивления воды – 50-60кОм·м. Процесс разряда мог сопровождаться возникновением дуги. Это иллюстрирует рис. 2.7.

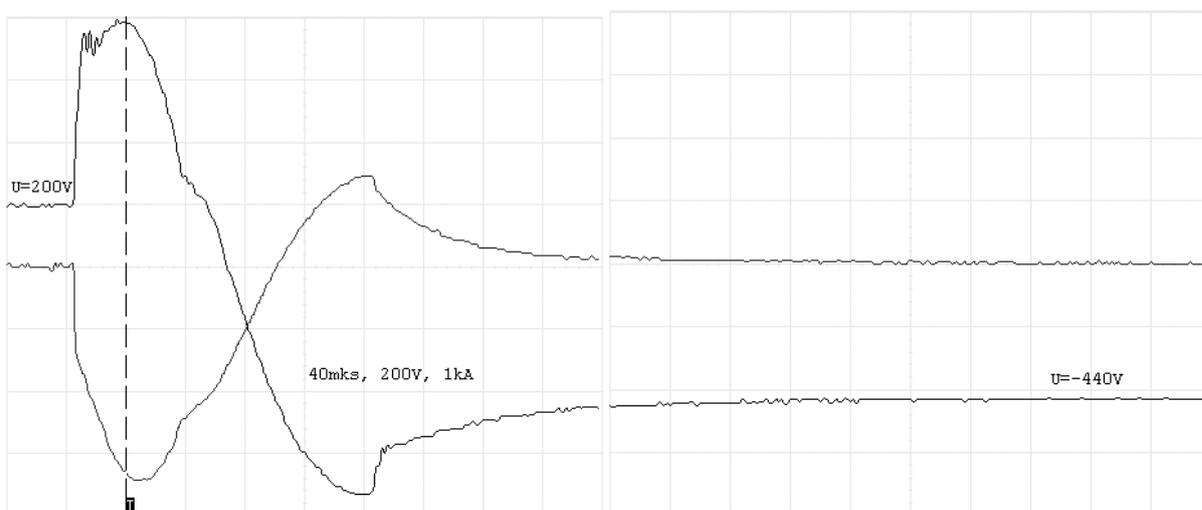


Рисунок 2.7 Дуговой разряд с перезарядкой конденсаторов (40мкс, 200В, 1кА на дел.)

Разряд имеет характерную длительность полупериода, составляющую около 150мкс. Не совсем обычным является то, что емкость, заряженная до напряжения плюс 200В, после разряда оказалась под напряжением минус 440В. Впрочем, нечто подобное могло происходить и без дугового разряда, если плазма лишь касалась противоположного электрода. Например, это показано на рис. 2.8. Исходное напряжение было 400В, после вспышки плазмы длительностью 440мкс напряжение возросло до 645В.

Для того чтобы оценить влияние продуктов электролиза воды на процесс инициирования плазмы, мы несколько видоизменили геометрию разрядной ячейки. Верхний электрод, диаметром 8мм, имел на плоском торце коническую выемку около 6 мм. Нижний, активный, был заостренным, и находился на расстоянии 5мм. При такой геометрии газообразные продукты электролиза накапливались в углублении верхнего электрода. Напряжение питания было понижено сначала до 150В, а затем до 50В и ниже. Чтобы активировать первичную плазму, использовали блок поджога от плазмотрона – осциллятор.

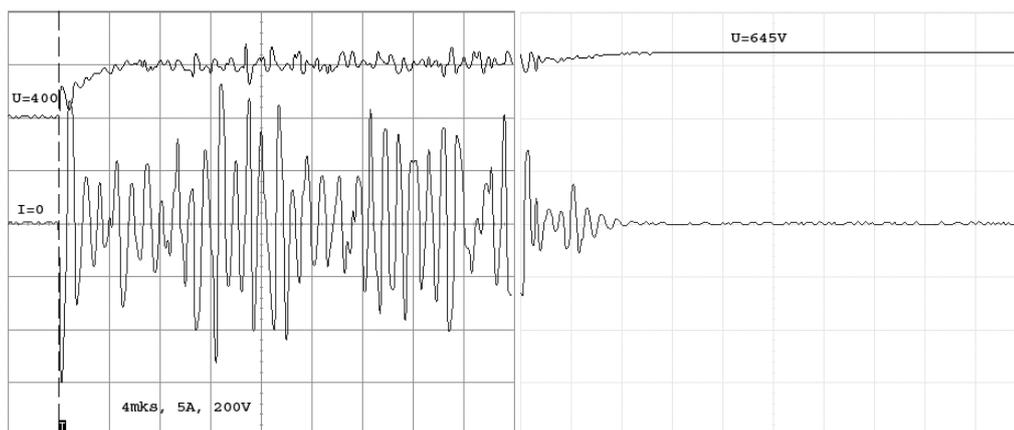


Рисунок 2.8 Подзарядка конденсаторов при вспышки плазмы  
(4мкс, 200В, 5А на деление шкалы)

Такая методика позволяла кратковременно, в течение 5мкс, повысить напряжение на активном электроде до 3-5кВ, и таким образом, надежно инициировать на нем образование плазмы. Первые опыты провели при напряжении равном 150В, однако в некоторых из них был отмечен дуговой режим (рис. 2.9).

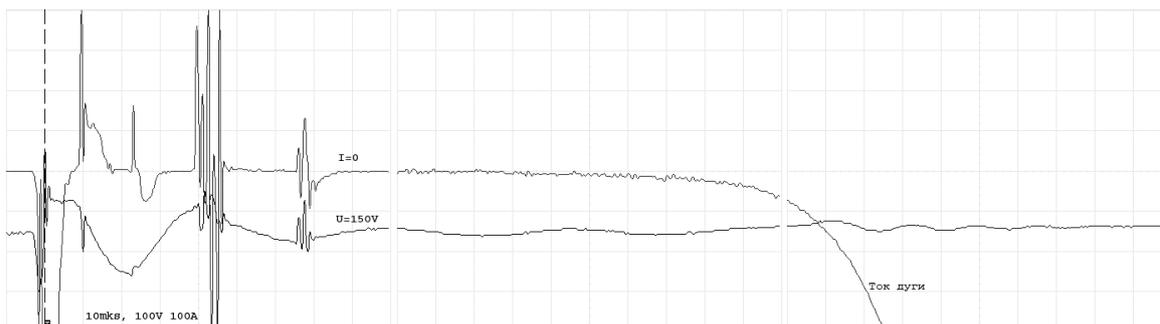


Рисунок 2.9 Переход разряда в дуговой режим  
(10мкс, 100В, 100А на деление шкалы)

Для уменьшения вероятности перехода разряда в дуговой режим напряжение питания понизили до 50В. При этом наблюдали последствие импульса – процесс взаимодействия плазмы с вытягивающим электростатическим полем (рис. 2.10). Верхняя кривая – ток плазмы, нижняя – напряжение. Здесь мы наблюдаем, что после импульса длительностью 5мкс, взаимодействие длилось около 80мкс. После этого напряжение источника увеличилось с 50В до 56В. Нечто подобное наблюдается и при подаче на активный электрод положительного напряжения (рис. 2.11). Однако длительность взаимодействия в данном случае увеличилась до 400мкс, а ток плазмы имеет совершенно иной характер.

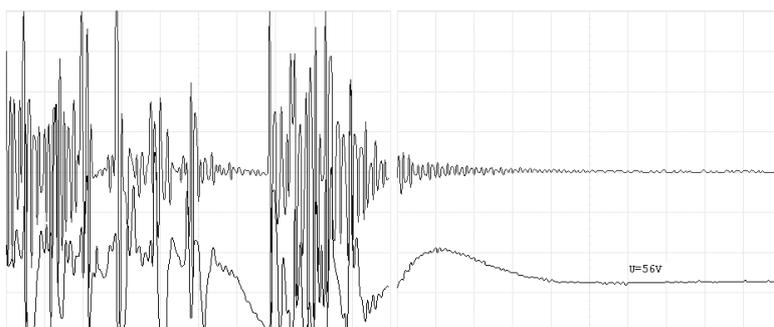
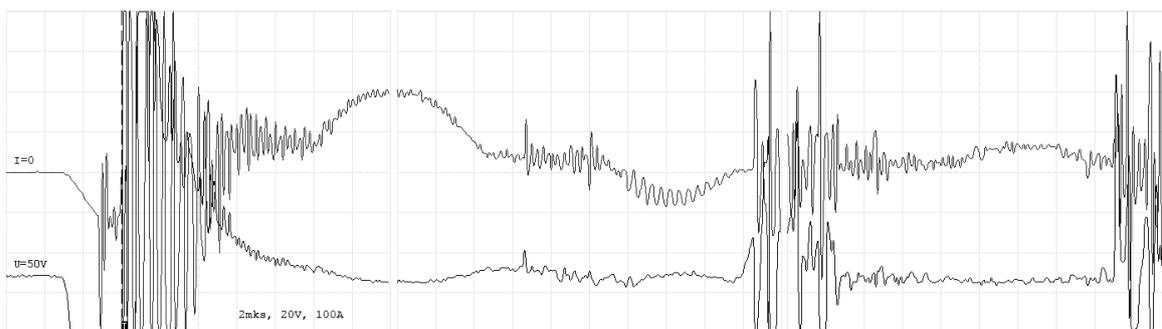


Рисунок 2.10 Взаимодействие плазмы с отрицательным вытягивающим потенциалом  
(2мкс, 20В, 100А на деление шкалы)

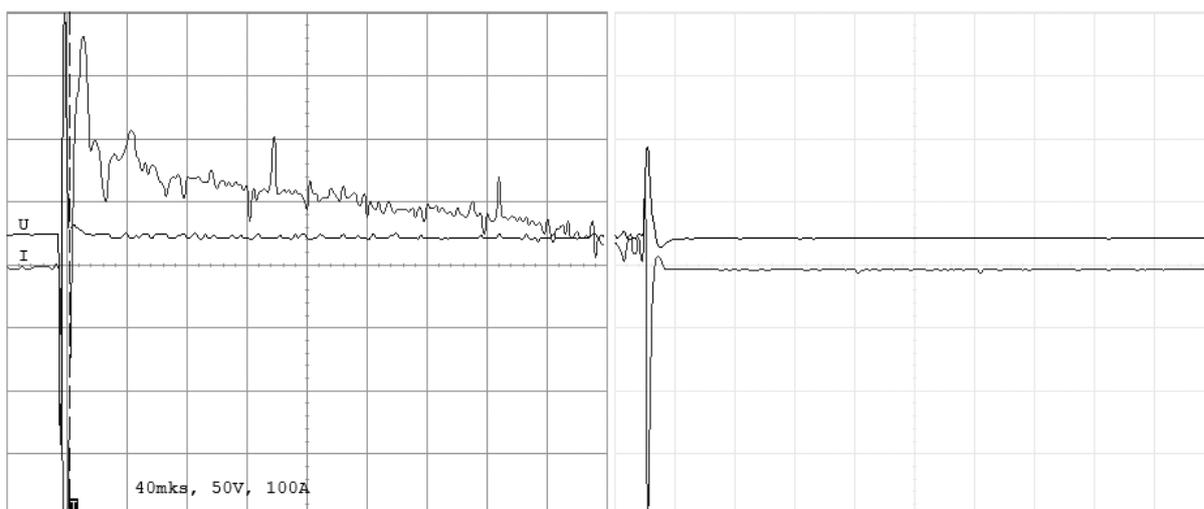


Рисунок 2.11 Взаимодействие плазмы с положительным вытягивающим потенциалом  
(40мкс, 50В, 100А на деление шкалы)

В целом последние опыты подтвердили наше предположение о положительном влиянии газообразных продуктов электролиза воды на процесс иницирования плазмы. Более убедительным стали рекомендации Вачаева А.В. по запуску реактора. Он советовал сначала включить цепь стабилизации, убедиться, что ток электролиза составляет не менее ампера, и только после этого подавать ток на иницирующие электроды.

### 3 Изучение взаимодействия плазмы со стабилизирующим полем

В предыдущем разделе мы рассматривали инициирование плазмы в водном растворе при помощи двух импульсных электродов. Следующим этапом процесса запуска экспериментального реактора является процесс стабилизации плазмы. Схема четырех электродного реактора имеется в предыдущих отчетах, поэтому здесь ее мы не приводим. В опытах использовали реактор с трубчатыми стабилизирующими электродами диаметром 10мм. Через них был организован проток водопроводной воды с малыми (0,2-0,5г/л) добавками солей щелочных металлов. Напряжение стабилизации подавалось из сети 220В, через дроссель, ограничивающий ток короткого замыкания на уровне 16-20А. Регистрировали ток и напряжение на стабилизирующих электродах после инициирования плазмы подачей напряжения на импульсные электроды (разряда). На активный (в данном случае не соединенный с нулевым проводом) импульсный электрод для сравнения результатов подавали как отрицательную, так и положительную полярность.

Обычно мы наблюдали два типа взаимодействия плазмы с контуром стабилизации. Первый мы относим к коммутации зоны стабилизации обычной низкотемпературной плазмой. Внешне он похож на разряд типа дугового. Второй тип взаимодействия вызывал на осциллограмме тока высокочастотные пакеты (рис. 3.1).

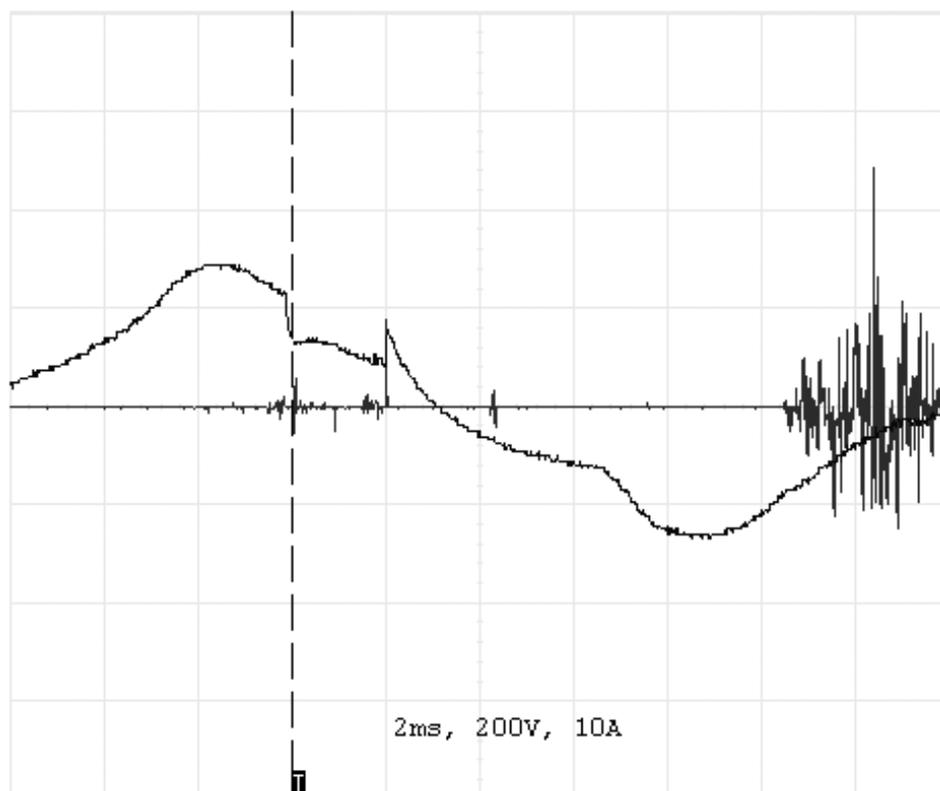


Рисунок 3.1 Задержка появления «пакета» после разряда

На рисунке мы наблюдаем сразу же после разряда в течение 2мс некий промежуточный тип взаимодействия. А пакет, характерный для второго типа, появляется лишь через 10мс. Иногда мы наблюдали практически мгновенное взаимодействие второго типа, причем увеличивающееся во времени по амплитуде (рис. 3.2). Это напоминает процесс запуска реактора. Взаимодействие происходило в момент максимального потенциала стабилизации (+300В). В момент угасания плазмоида напряжение кратковременно повысилось до 800В.

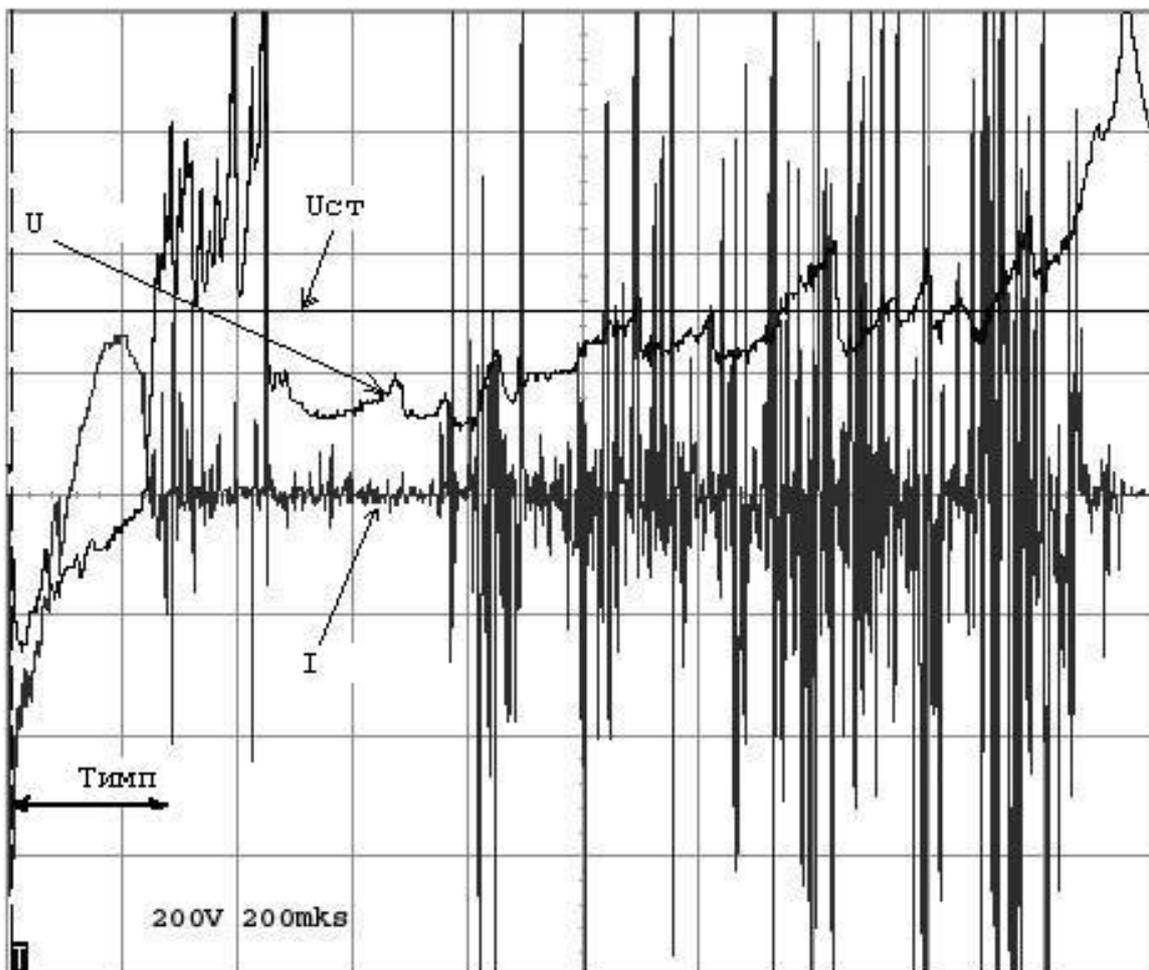
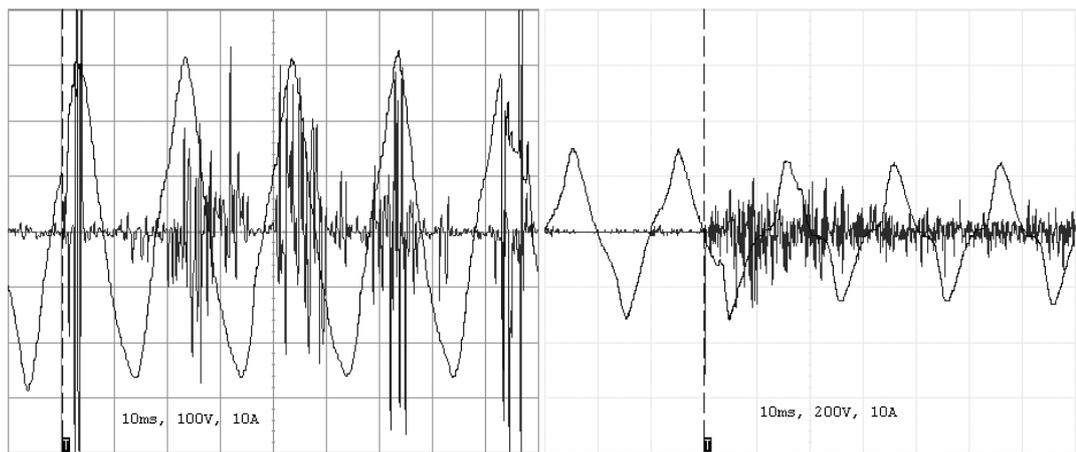


Рисунок 3.2 Мгновенное взаимодействие второго типа

Иногда мы наблюдали взаимодействие длительностью более четырех периодов стабилизирующего напряжения. Причем, как для анодной плазмы (рис. 3.3а), так и для катодной (рис. 3.3б). На рисунках практически отсутствуют признаки взаимодействия первого типа. Это позволяет предположить, что в обоих случаях была инициирована плазма, отличающаяся по свойствам от обычной низкотемпературной плазмы. Кроме того, судя по амплитуде взаимодействия, предпочтение следует отдать анодной плазме.



a – анодная плазма; b – катодная плазма

Рисунок 3.3 Длительное взаимодействие второго типа

Рассматривая процессы отклика цепи стабилизации на более длительном участке времени после стартового разряда, мы обнаружили любопытный факт. Оказалось, что время жизни плазмоида, даже при неудачной стабилизации, намного превышает длительность нескольких полупериодов (рис.3.4).

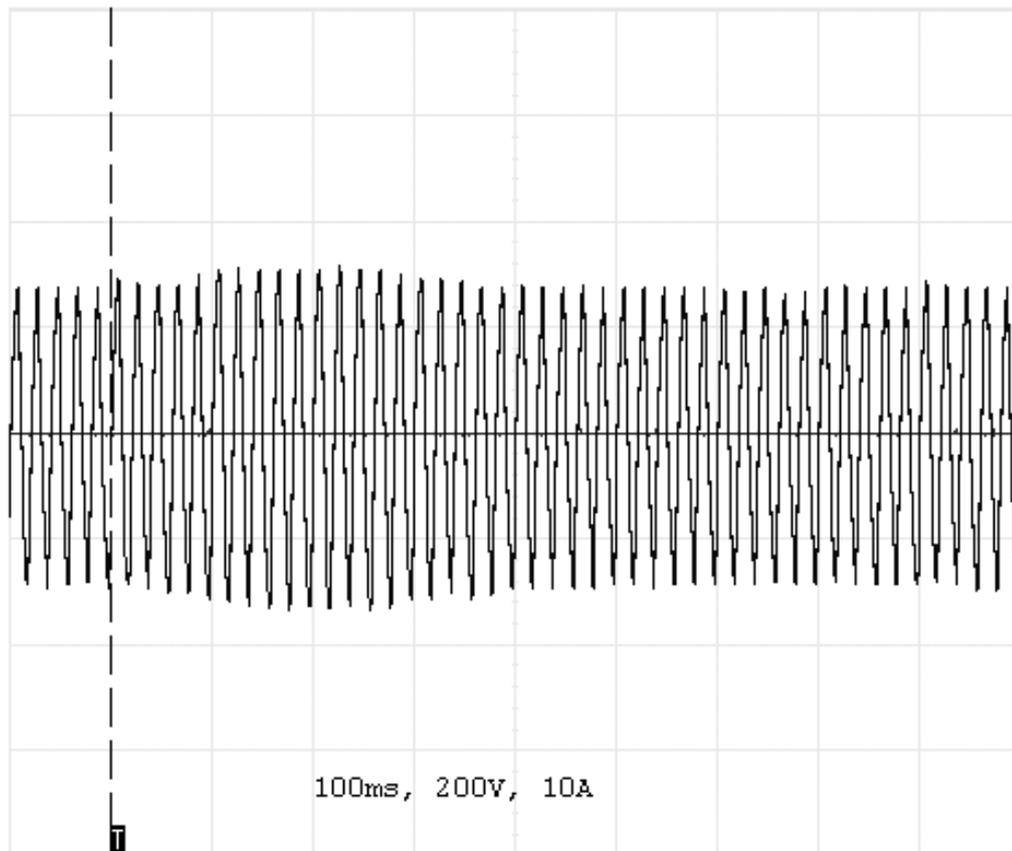


Рисунок 3.4 Генерация избыточного тока по цепи стабилизации

На осциллограмме зарегистрирован факт генерации реактором избыточной электроэнергии. В течение 0,2с амплитудное значение напряжения на стабилизирующих

электродах плавно повышалось с 300В до 365В. Затем в течение такого же времени уменьшалось до исходного значения. Это может означать лишь одно: четыре десятых секунды энергия отдавалась по цепи стабилизации в питающую сеть.

#### 4 Лабораторная установка для синтеза полиметаллических порошков

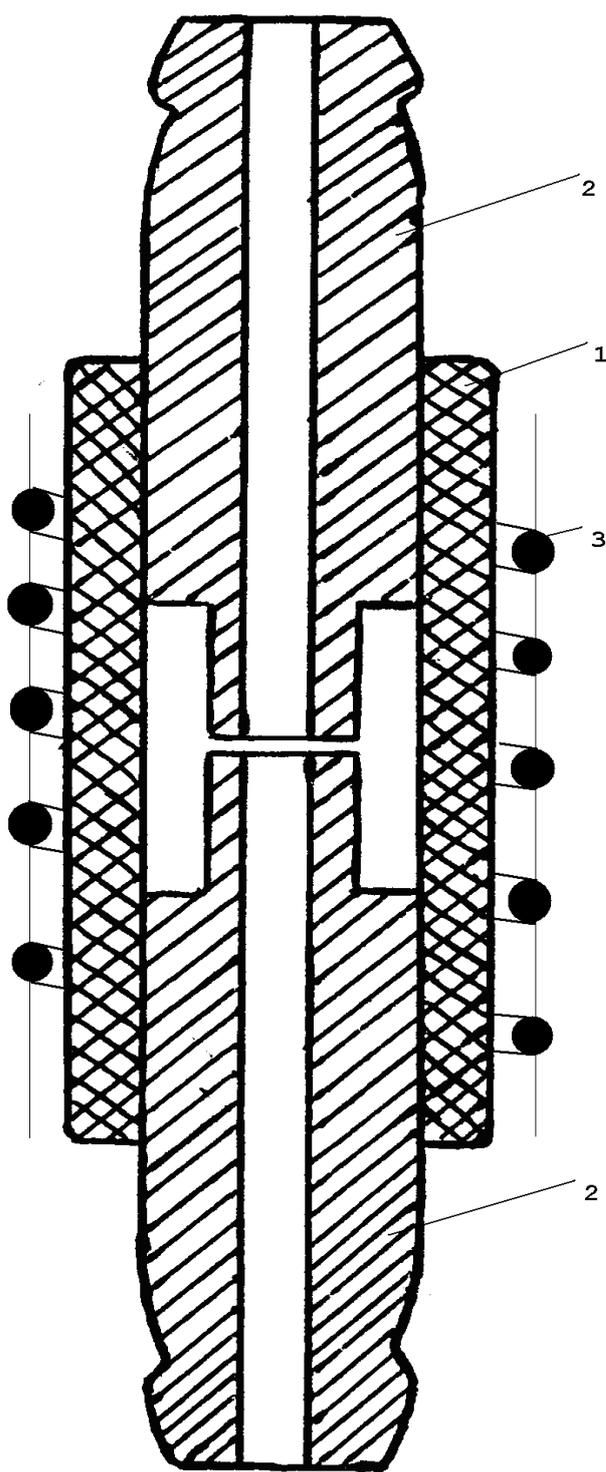
Результаты экспериментальных исследований по иницированию стабильного плазменного образования в водной среде были использованы для создания лабораторной установки, предназначенной для изучения процесса образования полиметаллического порошка. Первоначально планировалось использовать для этих целей реактор с двумя парами электродов. Два из них служат для иницирования плазменного образования, два других – для его стабилизации, а также для подачи воды и отвода полиметаллической коллоидной пульпы. Прототипом такого реактора служит установка А.В. Вачаева.

Несмотря на то, что проведенное исследование до некоторой степени приоткрыло сущность процессов, происходящих в период запуска реактора, однако в результате оно поставило вопросов, пожалуй, больше, чем дало ответов. Стало очевидным, что для успешной систематической работы со стандартным четырех электродным реактором данное исследование должно быть продолжено. Поэтому, для выполнения поставленной задачи мы использовали реактор с двумя электродами, дополнив его некоторыми доработками.

Основная доработка заключалась в фокусировке плазмы магнитным полем соленоида. Он был изготовлен из медной луженой шины сечением 16х6мм, содержал 6 витков и располагался вокруг корпуса реактора (рис.4.1). Конструктивно соленоид обладал достаточной жесткостью, чтобы не подвергаться деформации при протекании импульсных токов в десятки тысяч ампер. Соленоид был включен последовательно с электродами, и каждый импульс разряда создавал в пространстве между электродами обжимающее магнитное поле. Чтобы скомпенсировать индуктивность, вносимую соленоидом в разрядную цепь, параллельно электродам реактора был включен конденсатор емкостью 2,5нФ на рабочее напряжение 33кВ. Кроме того, эта емкость являлась элементом нагрузки для высокочастотной составляющей тока реактора.

В качестве источника питания реактора использовали опробованную ранее схему, основанную на последовательном резонансе тока промышленной частоты. Более подробно эта схема описана в предыдущем отчете.

Лабораторная установка содержала, кроме реактора и источника питания, емкость с исходной водой, шланги и зажимы, емкость для приема полиметаллической пульпы и контрольно-измерительные приборы. В качестве электролита применяли дистиллированную воду с добавкой натрия тетраборнокислого в количестве 0,5 грамма на литр с удельным сопротивлением порядка 30кОм·м.



1 – корпус; 2 – электрод; 3 – соленоид

Рисунок 4.1 Схема реактора с двумя электродами

Возбуждение реактора производилось короткими импульсами тока каждые 10 миллисекунд с чередующейся полярностью. Обзорная осциллограмма тока и напряжения на реакторе приведена на рис. 4.2. Верхняя кривая относится к току, напряжение смещено на два деления шкалы вниз, чтобы избежать наложения кривых.

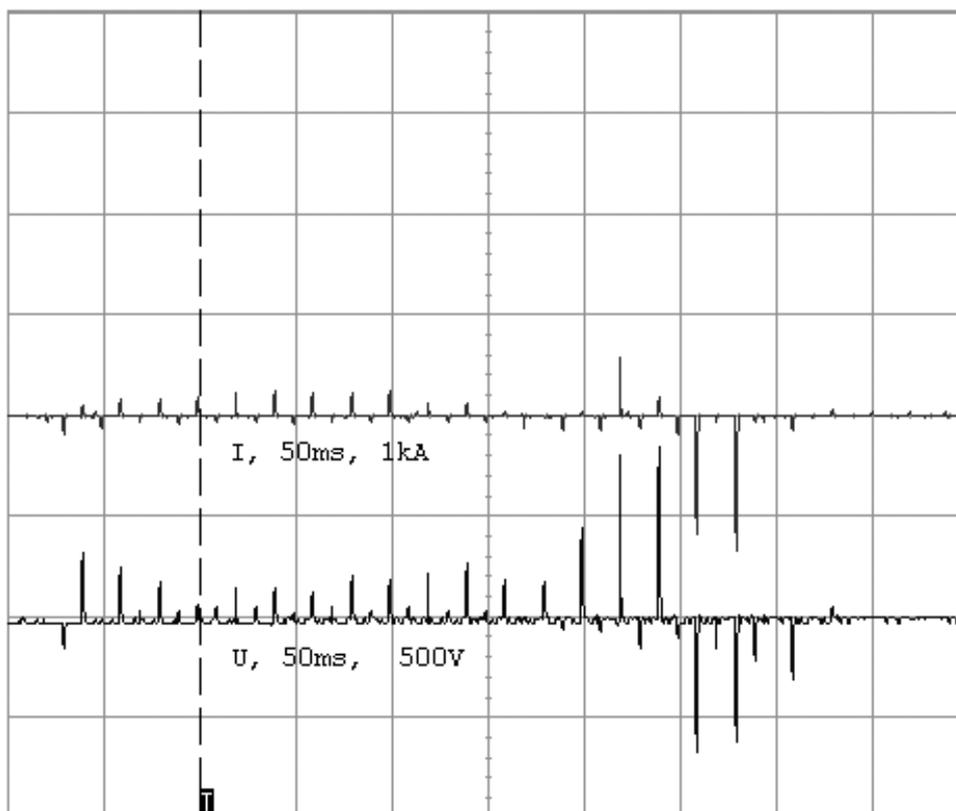


Рисунок 4.2 Осциллограмма тока и напряжения на реакторе

В промежутках между импульсами происходили акты синтеза полиметаллического порошка, каждый из которых проявлял себя мощным пакетом радиоизлучения. На рис. 4.3 проиллюстрирован вид таких пакетов, а в таблице 4.1 приведен элементный состав полиметаллического порошка.

Таблица 4.1 Элементный состав порошка, % массы

Символ	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Cr
Ат. №	13	14	15	16	19	20	22	24
Содерж.	0.15	0.75	1.6	0.27	0.059	1.72	0.034	0.059

Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mo
25	26	27	28	29	30	42
0.061	33.81	0.046	0.018	58.2	3.22	0.036

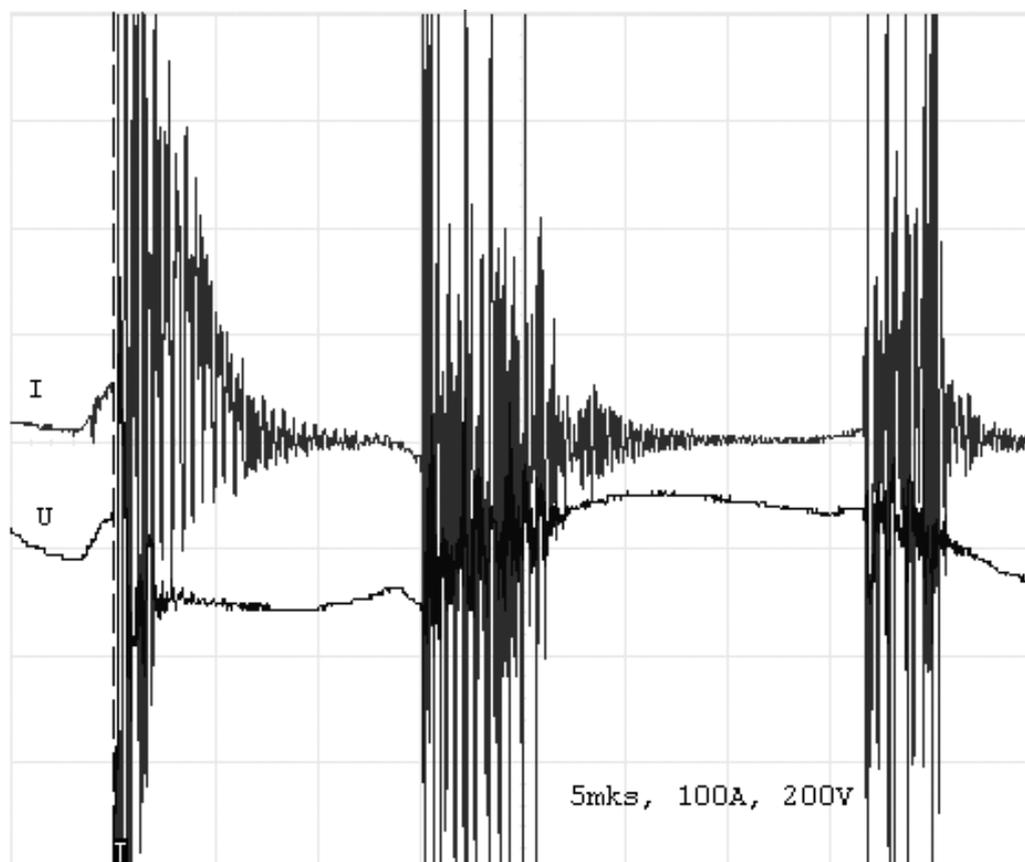


Рисунок 4.3 Пакеты тока, сопровождающие акты синтеза порошка

Если отбросить содержание меди, поскольку часть ее образовалась в результате эрозии медных электродов, то порошок содержит 41,8% по массе синтезированных в опыте элементов. Среди синтетических элементов доля железа составляет 80%, цинка – 7,7%, кальция – 4,1% и кремния – 1,8%. Содержание остальных восьми металлов не превышает одного процента.

Таким образом, применение в лабораторной установке магнитного обжатия плазмы в целом оправдало наши надежды. Содержание синтезированных порошков, благодаря этой доработке, повысилось практически в десять раз.

Тем не менее, мы считаем, что реактор такого типа может послужить лишь для демонстрации (в данном варианте, пожалуй, бесспорной) возможности осуществления реакций ядерного синтеза при низко энергетическом воздействии на вещество.