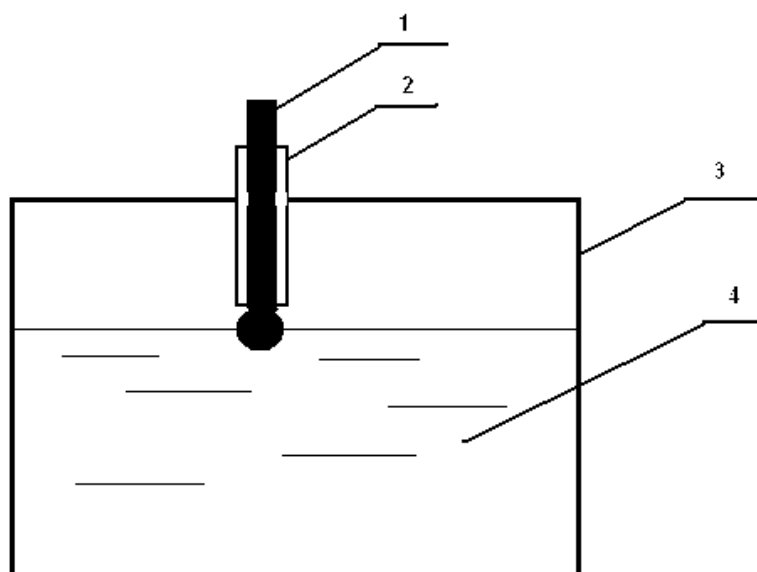


2. Экспериментальное исследование. Результаты и обсуждение.

2.1. Изучение вольтамперной характеристики процесса.

2.1.1. Методика измерения вольтамперной характеристики (ВАХ).

В качестве методики измерения ВАХ использовалась ячейка, позволяющая проводить замеры в режиме электрохимического диода. Этот режим обеспечивался тем, что поверхность токоподвода к жидкому электроду по размеру многократно превосходила поверхность твердого электрода, контактирующего с электролитом. Для этого электролит заливался в чашу из нержавеющей стали, которая и служила токоподводом. Твердый электрод, заостренный в рабочей зоне, касался поверхности электролита. На рисунке 2.1. изображена схематически измерительная ячейка (пример с платиновым электродом, проволока 0,5мм, оплавленный шарик диаметром 1мм).



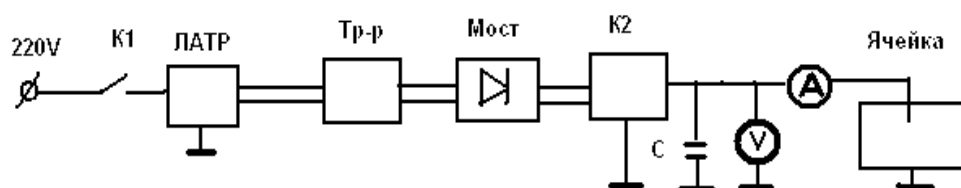
1 – твердый электрод; 2 – керамический изолятор, отводящий тепло; 3 – металлическая чаша; 4 – электролит.

Рис. 2.1. Измерительная ячейка.

Для катодной плазмы характерен разогрев рабочей поверхности твердого электрода до температуры, 1000°C и более. При увеличении тока

плазмы на вольфрамовом катоде рабочий участок электрода оплавлялся. Чтобы предупредить оплавление электрода применялся радиатор. Так платиновый проволочный электрод помещался в соломку из окиси алюминия, палладиевый электрод крепился на массивном медном токоподводе, а вольфрамовый электрод закреплялся на алюминиевом радиаторе.

Источник питания ячейки позволял производить плавную регулировку напряжения от нуля до 600В (на холостом ходу), коммутировать полярность напряжения на электродах и измерять ток и напряжение на ячейке. На рисунке 2.2. приведена его схема.



K1 – контактор; ЛАТР – регулятор напряжения; Тр-р – повышающий трансформатор 220/380В; Мост – выпрямитель; K2 – коммутатор полярности; С – сглаживающий конденсатор 3,8мФ; V, А – вольтметр и амперметр.

Рис. 2.2. Схема блока питания ячейки.

Для регистрации электромагнитного излучения плазмы были использованы два индикатора поля. Первый был изготовлен по схеме детекторного приемника. Вместо контура применялся широкополосный дроссель. Второй – без индуктивности, по схеме «вилка Авраменко». Индикаторы располагались на расстоянии 0,5-1 метр от ячейки. Они позволяли качественно оценить наличие и интенсивность электромагнитного поля по показаниям микроамперметра.

В ходе экспериментов выявилась некоторая погрешность методики, избавиться от которой не представилось возможности. Речь идет о погрешности оценки поверхности раздела между электродом и электролитом. В ходе соприкосновения электрода с жидкостью, за счет поверхностного натяжения и смачивания наблюдался подъем электролита по электроду. При подаче напряжения на электрод происходило интенсивное выделение газов, напоминающее кипение. Особенно это наблюдалось в анодном процессе, когда на металлическом электроде образовывался кислород. После возникновения плазмы на поверхности раздела, она также увлекалась в зону разряда ионов кислорода (увлекалась на анод, и отторгалась от катода).

В целом, данная систематическая погрешность мало повлияла на вид ВАХ. Критическая же плотность тока (минимальная плотность тока на электроде при переходе в режим плазменного электролиза) оценивалась следующим образом. За поверхность раздела фаз принималась поверхность электрода, погруженная в электролит (без учета капиллярных эффектов). Например, для случая, изображенного на рис.1.1, поверхностью раздела считалась половина поверхности шара.

В качестве твердого электрода в экспериментах использовали металлы – платина, палладий, медь, железо, вольфрам. Электролитом служила дистиллированная вода с незначительными добавками галогенидов лития, калия или цезия. Кроме того, использовали хлорид трехвалентного железа и натрий тетраборнокислый. Исходная проводимость электролита поддерживалась на уровне 1,7-1,8 мС/см. Измерения проводили кондуктометром DIST-3 фирмы HANNA. Для сравнения, водопроводная вода имеет проводимость порядка 0,25-0,35 мС/см.

Указанная проводимость исходного раствора была выбрана по следующим соображениям. При меньшей проводимости критическая плотность тока на электроде достигается при более высоком напряжении.

При этом возможностей блока питания по напряжению не хватает для измерений в «плазменной» области. При большей проводимости кривая ВАХ сдвигается влево, в сторону меньших напряжений. Выбранная проводимость позволила наблюдать начало образования плазмы на электроде примерно в середине диапазона регулировки напряжения.

Измерения проводили, увеличивая напряжение на ячейке с шагом 50-100В. Ток фиксировали через 5-10 секунд, после достижения газодинамического и гидродинамического равновесия в разделительном слое. В зоне подхода к критической плотности тока пауза несколько увеличивалась, но величина тока оставалась нестабильной. Причиной тому служил стохастический процесс очагового зарождения и угасания плазмы на поверхности электрода. После того, как плазма распространялась на весь разделительный слой, равновесие устанавливалось практически мгновенно.

2.1.2. Результаты исследования вольтамперных характеристик ячейки.

Для всех исследованных условий экспериментов (природа электролита и металлического электрода) форма кривой ВАХ качественно была одинаковой. На ней можно выделить три участка, характерные для различной физики процессов, происходящих в разделительном слое. Первый участок – почти линейный рост тока от нуля до максимума с увеличением напряжения на ячейке. Угол его наклона обусловлен исходной проводимостью электролита и величиной поверхности раздела. По сути – это классический электролиз водного раствора с интенсивным выделением газов у поверхности твердого электрода.

Второй участок характеризуется нарушением линейности и ослаблением роста тока с напряжением. Кроме того, на нем наблюдается стохастическое мгновенное уменьшение тока на 20-40% от среднего с последующим восстановлением значения при неизменном напряжении. Это связано с зарождением и угасанием очагов плазмы у поверхности

металлического электрода. По оси напряжения этот участок занимает относительно малое место.

Третий участок ВАХ начинается с быстрого уменьшения величины тока в 10 и более раз. Особенно это характерно для процесса на катоде. Индикаторы поля начинают регистрировать электромагнитную компоненту плазмы. Это участок плазменного электролиза. В качестве разделительного слоя между металлическим электродом и электролитом выступает пленка плазмы.

На рис. 2.3. изображены ВАХ катодного и анодного процессов для системы CsCl-Pt. На втором участке отмечено среднее значение колеблющегося тока.

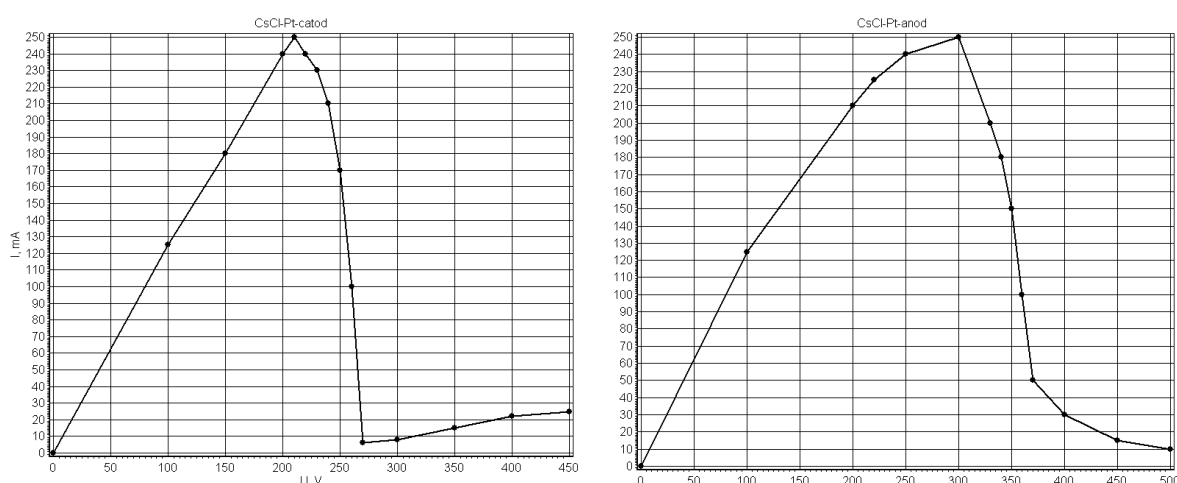


Рис. 2.3. ВАХ катодного и анодного процессов для системы CsCl-Pt.

Очевидно, что критическая плотность тока в данном случае не зависит от полярности электрода, и равна $0,16 \text{ A/mm}^2$. Однако на аноде она достигается при напряжении на 180В большем, чем на катоде. Второй участок ВАХ для анодного процесса более растянут по оси напряжения, а ток на участке плазменного электролиза монотонно уменьшается.

В характеристике катодного процесса на участке плазменного электролиза наблюдается минимум тока. Несмотря на то, что в задачи исследования не входила оценка коэффициента преобразования энергии

(КПЭ), данный участок представляет в этом смысле несомненный интерес. Мощность, потребляемая ячейкой, здесь составляет 1,3Вт. Даже по самым грубым оценкам, показания индикаторов поля регистрировали более высокий уровень мощности излучения в радиодиапазоне. Это не считая того, что катод раскален до температуры порядка 1000°C , идет электролиз с интенсивным выделением газов, разогревается раствор в ячейке.

Для сравнения приведем ВАХ очень похожей системы CsCl-Pd, изображенный на рис. 2.4.

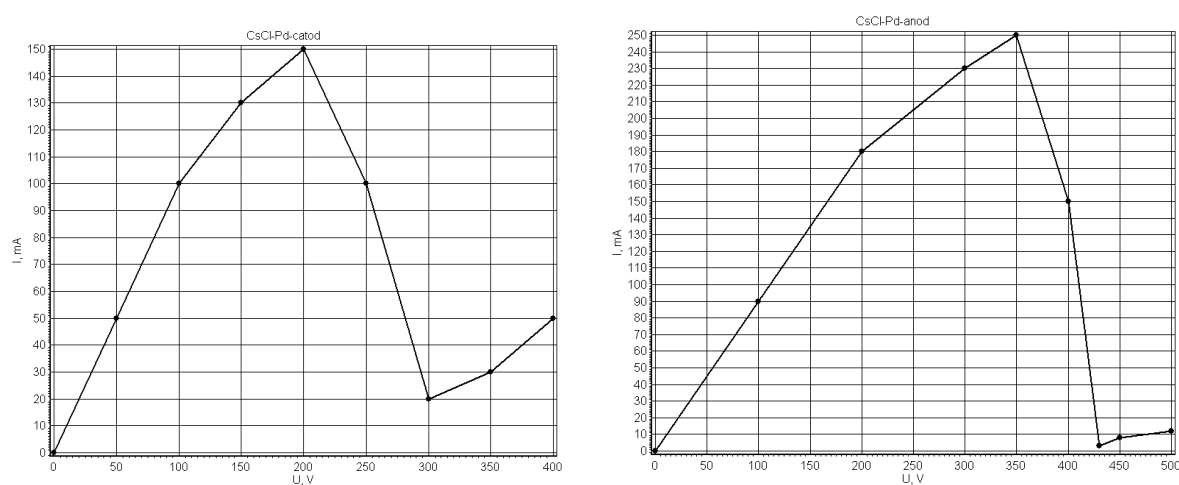


Рис. 2.4. ВАХ катодного и анодного процессов для системы CsCl-Pd.

В отличие от предыдущей системы здесь обнаружена разница критической плотности тока для катода и анода. Возможно, это связано с геометрией палладиевого электрода. Пластина, заточенная на острие, была закреплена на медном прутке. Он служил для подвода тока и отвода тепла. Кроме того для анодной плазмы зарегистрирован минимум тока, равный 3мА, с последующим восходящим участком. По всей вероятности, это общая закономерность ВАХ электродной плазмы. Просто в первом примере восходящий участок расположен по напряжению за пределами возможности блока питания ячейки.

Следует отметить, что величина минимума тока плазменного электролиза, каким-то образом связана с уровнем регистрируемого

электромагнитного излучения обратной зависимостью. Для систем FeCl_3 с вольфрамом и железом, падение тока после возникновения плазмы не превышало 20-30%. В то же время, индикаторы поля регистрировали весьма незначительные уровни. Напротив, в системе $\text{FeCl}_3\text{-Pt}$, ток падал с 200 до 30мА (рис. 2.5.), регистрировалось достаточно мощное электромагнитное поле.

В целом, проявление данного эффекта (существенного падения тока при появлении плазмы) усиливается для природы катионов электролита в ряду Fe-Li-Na-K-Cs . В первом приближении – с уменьшением потенциала ионизации (таб.2.1).

Таблица 2.1. Первый потенциал ионизации элементов

Элемент	Fe	Li	Na	K	Cs
$E_{\text{ион.1}}, \text{В}$	7.9	5.39	5.14	4.34	3.89

Для материала электрода, то это ряд $\text{Fe-W-Cu-Ni-(Pd; Pt)}$. В данном случае преимущества природы материала менее очевидны.

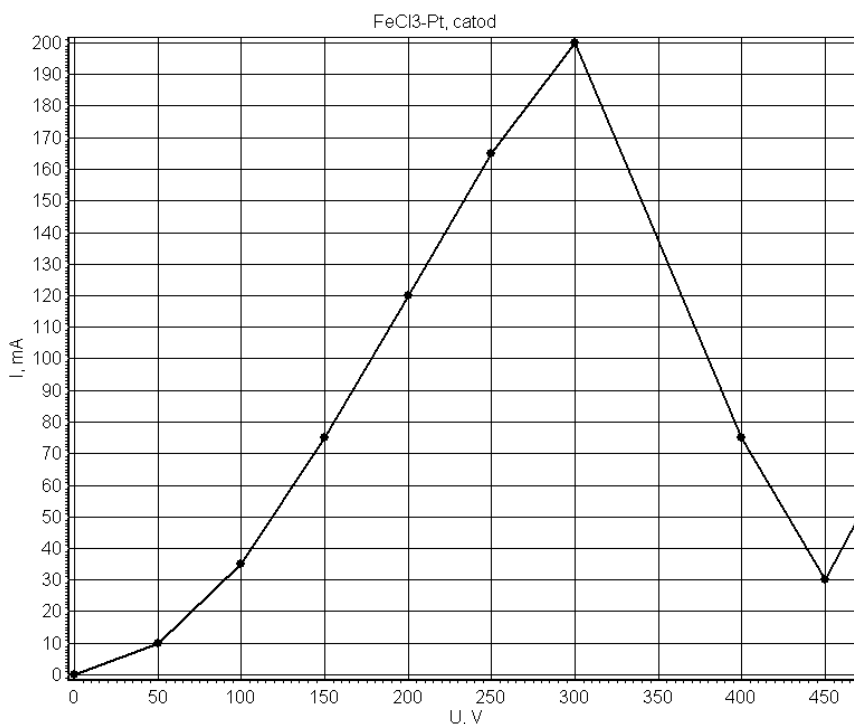


Рис. 2.5. ВАХ катодного процесса для системы $\text{FeCl}_3\text{-Pt}$.

Если вспомнить истоки данной работы - реактор «Энергонива», созданный профессором Вачаевым А.В., то можно сделать вполне очевидное предположение. Ранее мы отмечали тот факт, что на данном участке характеристики КПЭ ячейки, даже по самым приблизительным оценкам, превышает единицу. Причиной тому может служить лишь то, что дополнительная энергия выделяется в процессе низкоэнергетического ядерного синтеза. Интенсивность электромагнитного излучения плазмы является индикатором этого процесса, и пропорциональна его интенсивности. Конечно, по сравнению с реактором «Энергонива», выделение энергии ничтожно. Однако то, что в плазменном электролизе идут подобного рода процессы, имеет принципиальное значения. В отличие от процессов в реакторе Вачаева А.В., воспроизвести которые пока никому в полном объеме не удастся, катодная плазма вполне стабильный и легко повторяемый процесс.

2.2. Зависимость проводимости воды от частоты синусоидального тока.

Примечание автора. Следует осторожно относиться к результатам данного раздела. Возможно, они вызваны с резонансными явлениями во внешней цепи ячейки.16.08.201.

Ранее было установлено, что плазменный электролиз сопровождается широкополосным электромагнитным излучением. В литературе практически нет работ по влиянию высокочастотного поля на свойства воды. Поэтому была проведена небольшая экспериментальная работа. Измерялась проводимость воды под воздействием синусоидального напряжения звукового генератора (ЗГ) в диапазоне частот 0-10МГц.

В работе был использован генератор ГЗ-112. В стакан с водой помещался датчик. Он представлял собой две пластины из нержавеющей стали, закрепленные параллельно на изоляторах. Толщина пластин – 0,5мм, расстояние между ними – 2мм. На пластины с генератора через резистор 1кОм подавался сигнал. Падение напряжения на резисторе регистрировалось

осциллографом. Полученная таким образом зависимость тока через датчик от частоты, пересчитывалась впоследствии в проводимость воды.

На рис. 2.6. изображена зависимость удельной проводимости от частоты для дистиллированной воды. Ее начальная проводимость составляла 1-2mkS/sm.

Экспериментально было зарегистрировано резонансное увеличение проводимости воды в сотни раз на частоте 2,7МГц.

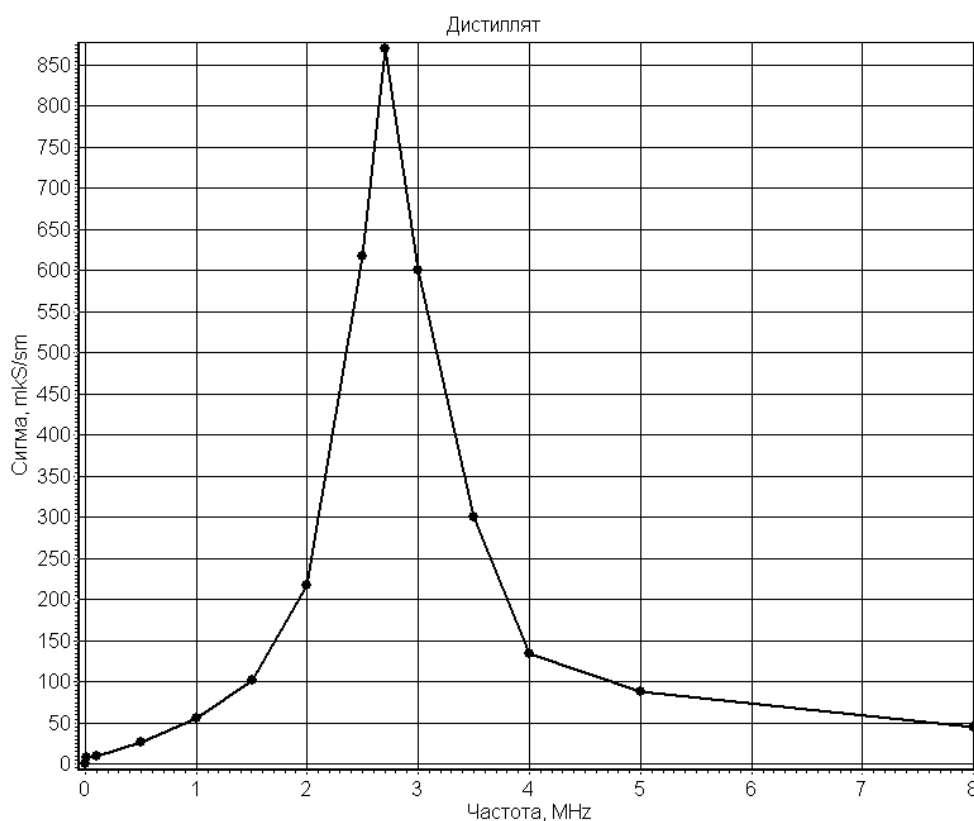


Рис. 2.6. Частотная зависимость проводимости для дистиллированной воды.

С увеличением ионной проводимости примесями солей, амплитуда резонанса быстро уменьшается. Для раствора CsCl с исходной проводимостью всего 40mkS/sm, проводимость увеличилась в 6 раз на частоте 2,3МГц. Отстоявшаяся водопроводная вода с исходной проводимостью 350mkS/sm показала двукратное увеличение проводимости

на частоте 0,1МГц. На частоте 2МГц проводимость вернулась к исходному значению, монотонно уменьшаясь с дальнейшим повышением частоты.

Таким образом, резонанс был почти полностью подавлен растворенными в воде солями.

2.3. Зависимость проводимости воды от частоты несинусоидального тока.

Поскольку в реальном реакторе «Энергонива» генерируется несинусоидальное электромагнитное поле, было решено попытаться моделировать его искусственно. Для этого был изготовлен модулятор, позволяющий прерывать синусоидальный ток промышленной частоты с частотой, задаваемой звуковым генератором. На рис. 2.7. изображена принципиальная схема модулятора. Транзисторы модулятора работают попеременно. Верхний по схеме транзистор модулирует положительный полупериод, нижний – отрицательный. Импульсный трансформатор Тр1 обеспечивает гальваническую развязку ЗГ от фазового потенциала. Резистор R1 ограничивает максимальный ток модулятора на уровне 2А.

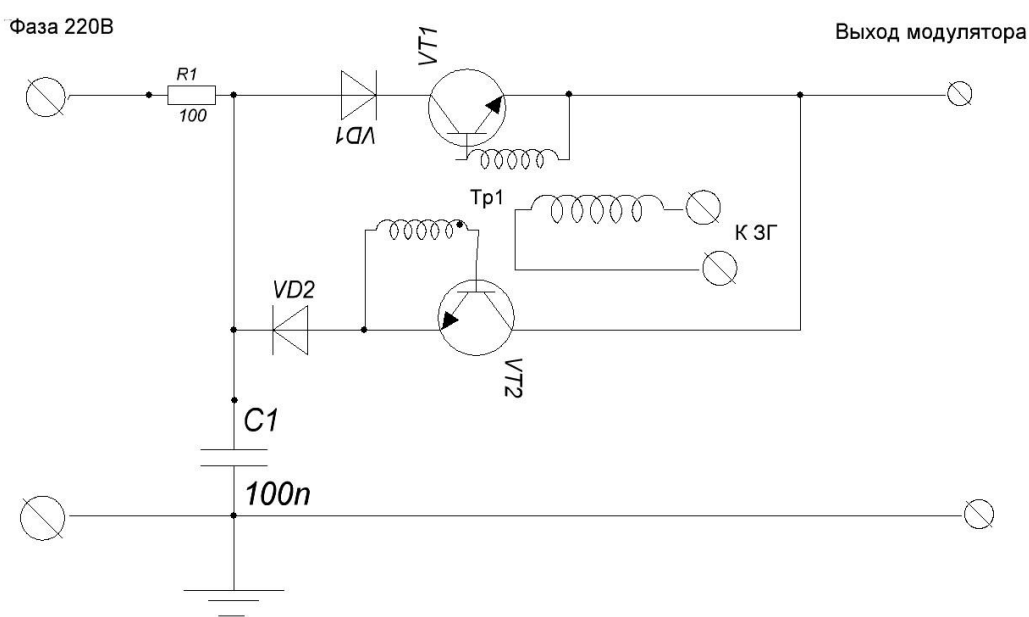


Рис. 2.7. Схема модулятора тока.

Выход модулятора соединялся с электрохимической ячейкой. В стакан с водой погружались два платиновых электрода диаметром 0,5мм. Зазор между электродами был равен 1,5мм, а длина неизолированной части – 1мм. Между общим (нулевым) проводом модулятора и ячейкой подключался резистор величиной 10м. С него снимался токовый сигнал на осциллограф. Поскольку амплитудное значение напряжения модулятора на холостом ходу составляло около 300В, измеряемый ток ячейки был пропорционален проводимости воды в зазоре электродов.

Под воздействием такой формы электрического поля, основной резонанс увеличения проводимости дистиллята пришелся на 1,82МГц. Зарегистрированы также четные низшие, и она высшая гармоники резонанса (3,64МГц, 0,91МГц, 0,455МГц и т.д.). При увеличении проводимости исходной воды хлоридом цезия до 300мкС/см и более, резонанс проводимости сохраняется на тех же частотах. Однако, при подходе к частоте основного резонанса, частота тока, протекающего через воду, скачком принимает значение первой низшей гармоники – 0,91МГц. На рис. 2.8. приведена характерная осциллограмма тока ячейки для частоты модуляции 0,455МГц (дистиллированная вода).

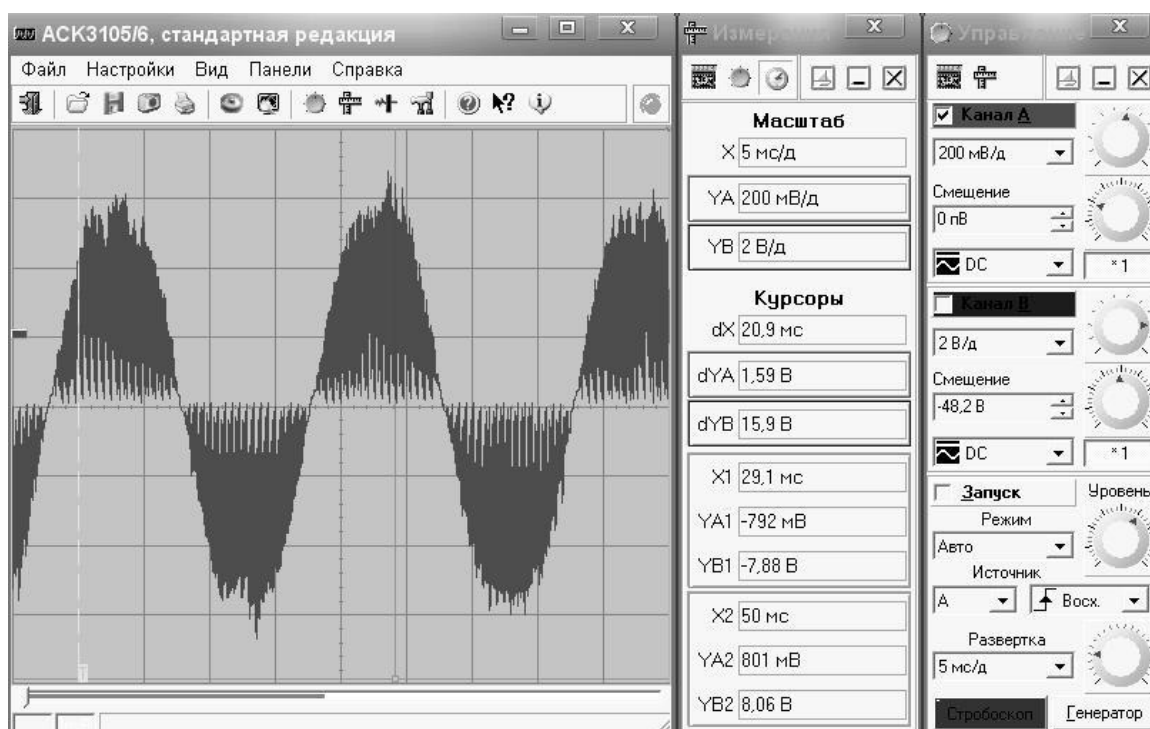


Рис. 2.8. Осциллограмма тока ячейки на частоте модуляции 0,455МГц.

Амплитудное значение тока через дистиллированную воду в данном случае составляло около 0,6А. Несомненно, что конечной целью данных экспериментов было увеличение плотности тока на электродах до возникновения плазмы. Мы надеялись, что плазма, возбужденная током такой же формы, как в «Энергониве», может запустить стабильный процесс синтеза металлов. Однако параметры применяемых транзисторов не позволили этого достичь. Тем не менее, после длительной (20-30мин) работы ячейки на резонансной частоте, на дне стакана обнаруживался порошок темного цвета. Причем оттенки его были различными для дистиллированной воды, и растворов CsCl или буры. Эрозия платиновых электродов при этом не наблюдалась. Малое количество порошка не позволило провести его анализ.

Заключение.

В предыдущем отчете мы ссылались на работы профессора Канарева Ф.М. по плазменному электролизу водных растворов. Он оценил эффективность процесса (КПЭ) для катодной плазмы, как 1,8. Учитывался только нагрев раствора. Его коллеги из Японии Ohmori и Mizuno, исследовав состав поверхности вольфрамового катода после плазменного электролиза, обнаружили железо, хром и никель. Они объяснили появление новых элементов возможным протеканием низкоэнергетического ядерного синтеза в прикатодной плазме.

Опираясь на результаты, полученные в данном исследовании, можно утверждать, что параметры работы ячейки Канарева Ф.М. можно значительно оптимизировать. Поверхность раздела плазмы с электродом в его экспериментах была около 50мм². Для образования плазмы приходилось повышать ток до 9А. При этом напряжение на катоде было около 60В. Это говорит о том, что исходная проводимость раствора (KOH, NaOH), была значительно завышена. Ток ячейки, после перехода в плазменный режим уменьшался всего в 1,5 раза, до 6А. На осциллограмме напряжения (нефильтрованное, выпрямленное мостом напряжение 50Гц) катода видна слабая бахрома высокой частота на пиках напряжения. В наших экспериментах, амплитуда высокочастотной составляющей достигала величины питающего напряжения, а иногда и превосходила его. Таким образом, на наш взгляд, процесс плазменного электролиза может явиться весьма перспективным объектом для дальнейших исследований. Хорошо просматриваются возможности его практического применения.

В ходе исследования проводимости воды под воздействием внешнего поля было обнаружено резонансное изменение ее свойств от частоты поля. Особый интерес представляют результаты по воздействию на воду поля несинусоидальной формы (идентичной току реактора «Энергонива»). В

перспективе, применив в модуляторе более мощные транзисторы, мы намерены достичь образования плазмы в межэлектродном промежутке. Такая плазма должна быть идентичной по свойствам плазмой А.В. Вачаева. Это дает надежду получить, наконец, инструмент для надежного запуска реактора.