РЕЖИМЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АВТОВОЛН ВОЗБУЖДЕНИЯ В ПРИЭЛЕКТРОДНОМ СЛОЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ*

Чеканов В.В[1]., Кандаурова Н.В2., Чеканов В.С.[2]
[1]ФГАОУ ВО Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, e-mail: chknv1@yandex.ru
[2]Филиал ФГБОУ ВО «Московский технологический университет»
в г. Ставрополе, г. Ставрополь, пр.Кулакова 8, candaur18@yandex.ru

Введение

Автоволны возникают в различных средах химического, физического, биологического происхождения. Важным примером возбудимых, активных сред, в которых протекают автоволновые процессы, являются многие биологические ткани и в том числе миокард сердца. Распространение нервного импульса в сердечной мышце имеет автоволновую природу и подчиняется универсальным законам распространения автоволн. Нарушение режимов распространения автоволн приводит к серьезным патологиям. Управляя возникшей волной при помощи внешних воздействий, можно ликвидировать такую патологию. Этими соображениями определяется важность исследования автоволновых процессов. В настоящей работе исследуются режимы распространения автоволн возбуждения, которые наблюдались в приэлектродном слое магнитной жидкости.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

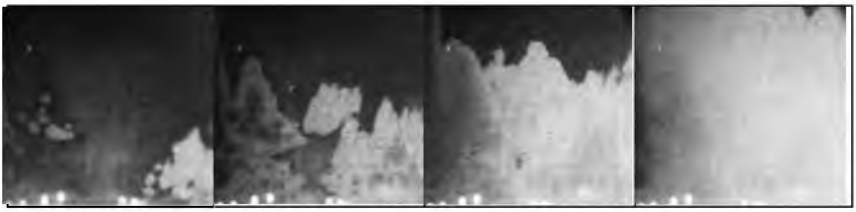
Методика эксперимента

Известно, что в магнитной жидкости, помещенной в ячейку с прозрачными электродами (плоский конденсатор) в электрическом поле образуются приэлектродные слои, состоящие из плотноупакованного слоя частиц магнетита с защитной оболочкой. Этот слой представляет собой возбудимую среду, в которой наблюдался автоволновой процесс (АВП). Визуализация АВП основана на электрооптическом эффекте, возникающем в магнитной жидкости в электрическом поле: слой частиц магнетита имеет показатель преломления, близкий по значению к показателю преломления прозрачного электрода (ITO). То есть структура «электрод – приэлектродный слой» оптически однородна. Толщина слоя изменяется в зависимости от поданного на

электроды ячейки напряжения. Если осветить поверхность ячейки белым светом, то он будет отражаться от границ «стекло-электрод» и «электрод+слой частиц магнетита – магнитная жидкость». Поверхность ячейки окажется окрашенной в разные цвета в зависимости от толщины структуры «электрод-слой частиц магнетита». Явление это, известно под названием цветов тонких пленок. Максимум спектра отраженного света с увеличением толщины приэлектродного слоя смещается в сторону длинных волн.

Режим «быстрых» автоволн

В работе [1] изложена методика расчета толщины приэлектродного слоя. В зависимости от приложенного к электродам ячейки напряжения толщина слоя изменяется в пределах до 100 нм. Удельное сопротивление слоя такой толщины на несколько порядков больше удельного сопротивления жидкости в ячейке (толщина слоя жидкости в ячейке ~ 40 ??). Следовательно, напряженность поля при стационарном токе в слое такой толщины также будет больше на несколько порядков. При некотором критическом напряжении на электродах, напряженность в слое становится ~ 10^7 В/м , он становится проводящим (эффект Вина). Отдельные элементы (ансамбли частиц) приобретают заряд, одноименный с электродом, отталкиваются от него. На поверхности ячейки видна пробегающая волна (рисунок 1а, б , в, г) На цветных фотографиях темный цвет соответствует зеленому, светлый – оранжевому и малиновому.



а б в г

Рисунок 1 - «Быстрая» волна в приэлектродном слое ячейки с магнитнойжидкостью

Отметим, что весьма полную информацию о процессе эволюции автоволновой структуры можно получить, описывая только изменение со временем положения фронта волны. На этом основан кинематиче-ский подход к описанию автоволновых структур [2].

Так как ячейка имеет размеры 3·4 см, то можно оценить среднюю скорость движения фронта волны. От появления участков зеленого цвета (рисунок 1а) до заполнения этим цветом всей поверхности ячей-ки проходит ~ 0,25с. Назовем такую волну «быстрой», скорость ее движения ≈16 см/с. Она подобна распространению пламени по степи, подожженной в разных местах. Это известная задача, решенная Я.Б.Зельдовичем и Д.А Франк-Каменецким.

Режим «медленных» автоволн

Далее элементы слоя (ансамбли частиц) попадают в объем ячейки, распадаются, теряют одноименный с электродом заряд. Они заряжаются в объёме ячейки зарядом противоположного знака и, вследствие электро- и диполофореза, начинают свое движение к электроду. За первой волной следует вторая, на поверхности ячейки наблюдается картина автоволнового процесса (рисунок 2). Волны движутся со скоростью ≈ 1 см/с. Это так называемые фазовые, «медленные» автоволны.

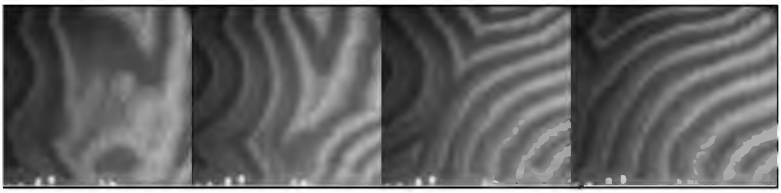


Рисунок 2 - Фазовые («медленные») автоволны в приэлектродном слое ячейки с магнитной жидкостью

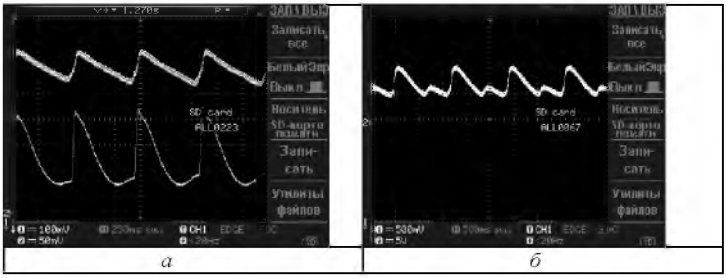
То есть приэлектродный слой магнитной жидкости представляет собой возбудимую среду с восстановлением.

Релаксационные автоколебания. Моделирование работы сердца

В работе [3] было установлено, что сопротивление ячейки при прохождении через нее постоянного тока вследствие образования приэлектродных слоев увеличилось в несколько раз. В той же работе было показано, что емкость, связанная с прохождением тока через ячейку (поляризационная емкость) на 3-4 порядка больше статической емкости ячейки с МЖ. Такое увеличение емкости ячейки в электрическом поле, как и увеличение сопротивления, можно свя-

зать только с появлением приэлектродных слоев. Так как толщина слоев зависит от напряжения на электродах, то и накапливаемый в ячейке заряд, емкость и сопротивление, измеренные по току разряда, тоже зависят от напряжения на электродах. Таким образом, ячейка с МЖ представляет собой конденсатор переменной емкости.

Если последовательно подключить добавочное переменное сопротивление R = 0 ÷ 4 МОм, в связи с тем, что ячейка с магнитной жидкостью (конденсатор) имеет большую емкость, в приэлектродном слое возникают релаксационные колебания тока типа «накопление-сброс» (рисунок 3 а, луч 1). По рисунку видно, что период колебаний может быть разделён на несколько резко разграниченых этапов, соответствующих медленным и быстрым изменениям состояния системы. Быстрый этап соответствует времени возбуждения системы, то есть разрядке конденсатора (через шунт). Медленный этап соответствует периоду рефрактерности – образованию слоя, накоплению заряда до порога неустойчивости. Рефрактерность – это одно из важнейших отличительных свойств возбудимой среды – необходимость некоторого времени на восстановление свойств после прохождения импульса (разряда конденсатора).



а б

Рисунок 3 *а* –осциллограмма релаксационных автоколебаний тока типа «накопление-сброс» в ячейке с МЖ без препятствия. Луч 1– зависимость тока от времени, луч 2 - оптический сигнал, *б* – осциллограмма релаксационных колебаний тока в ячейке с МЖ с препятствием

Если поверхность ячейки освещается монохроматическим светом (лазером), то по интенсивности отраженного луча, можно получить информацию о толщине приэлектродного слоя [1]. Луч 2 на рисунке

3 *а* – оптический отклик отраженного луча (λ=650 нм). Максимум оптического сигнала соответствует началу образования приэлектродного слоя – началу зарядки конденсатора (ячейки с МЖ). Визуально виден зеленый цвет поверхности ячейки. Начало разрядки соответствует разрушению слоя – резкому изменению цвета поверхности ячейки с зеленого на малиновый. Время заряда – 0,5 с, время разряда – 0,1 с. Можно предположить, что наблюдаемый процесс релаксационных колебаний имитирует работу сердечного миокарда.

Распространение автоволн в среде с локальной неоднородностью. Моделирование сердечной патологии

В приэлектродном слое ячейки с магнитной жидкостью была создана локальная неоднородность, как показано на рисунке 4. Осциллограмма тока в этом случае имеет вид, показанный на рисунке 3 б. Этапы распространения автоволны показаны на рисунке 4, где видно, что вокруг неоднородности имеется область, колебания в которой происходят с фазой, отличной от колебаний поверхности ячейки.

По осциллограмме на рисунке 3 *б* видно, что область вокруг локальной неоднородности имеет время рефрактерности R_1, отличное от времени рефрактерности R2 среды. Поэтому фронт волны доходит до участка с рефрактерностью R_1 и разрывается. Таким образом, возникает аритмия в колебаниях между поверхностью ячейки в целом и областью вокруг локальной неоднородности.

Если в миокарде (мышечном среднем слое) сердца имеется неоднородность, например инфаркт, означающий, что на каком-то участке отсутствует кровоснабжение, то подобная трансформация ритма может возникнуть в сердечной мышце.

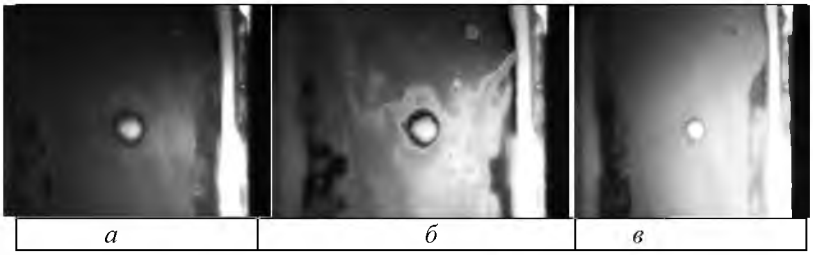


Рисунок 4 - Распространение автоволн в среде с локальной неоднородностью

Выводы

Слой частиц дисперсной фазы магнитной жидкости, образующийся у поверхности прозрачного электрода в электрическом поле представляет собой возбудимую среду. В ней наблюдались и исследовались различные режимы возникновения и распространения автоволн. Преимущество такой среды заключается в том, что можно получить неограниченное количество автоволновых циклов, в отличие, например, от известной реакции Белоусова-Жаботинского, где количество наблюдаемых автоволновых циклов ограничено вследствие прекращения реакции. Визуализация автоволновой картины основана на электрооптическом эффекте – электроинтерференции – возникающем в магнитной жидкости в электрическом поле.

В работе были исследованы различные режимы распространения автоволн в возбудимой среде: «быстрые» и «медленные» автоволны, релаксационнные автоколебания, автоволны в среде с локальной неоднородностью.

Наблюдаемые автоволновые процессы могут быть использованы в качестве модели для процессов, протекающих в миокарде сердца.

Литература:

1. Chekanov V V.,Kandaurova N.V.,Chekanov V.S. //Journal of Nano- and Electronic Physics , Vol. 8 No 4, 04045(3pp) (2016)
2. В.А. Давыдов, В.С. Зыков, А.С. Михайлов, УФН, 1991, т.161, № 8, С. 45-83.
3. Чеканов В.В., Кандаурова Н.В., Чеканов В.С. Поляризационная емкость и сопротивление приэлектродного наносл оя магнитной жидкости в электрическом поле. – Материалы III Международной научно-практической конференции «Физика и технология наноматериалов и структур» Курск, 23-25 мая 2017 года.

*Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания. Проект № 3.5385.2017/БЧ «Экспериментальное исследование и математическое моделирование межфазных и приповерхностных явлений в тонкой пленке наноструктурированной магнитной жидкости»