

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**«ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ОБЪЕКТОВ В
СПЛОШНЫХ ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ»**

Выполнил студент
группы 205м
Хапкин Н.В.

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., профессор
Поляков П.А.

Допущена к защите _____

Зав. кафедрой _____

Москва
2018 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В СЛАБОПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ.....	6
2. РЕГИСТРАЦИЯ ДВИЖУЩЕЙСЯ РЫБЫ В ВОДЕ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОДОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ.....	11
2.1. Описание экспериментальной установки и метод измерения	11
2.2. Результаты измерений электрического поля, возникающего при появлении клариевого сома в области чувствительности электродов.....	13
2.3. Анализ полученных экспериментальных результатов	17
3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ РЕГИСТРАЦИИ ОБЪЕКТОВ В ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ ПО ИЗМЕНЕНИЮ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕДЫ..	19
3.1 Описание экспериментальной установки.....	20
3.2 Эксперимент по электрорезистивной регистрации колебаний поверхности жидкости.....	20
3.3. Электрорезистивный метод регистрации движущегося объекта в проводящей среде.....	22
3.4 Вывод	25
4. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНОГО МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ ОБЪЕМНОГО ТЕЛА В ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ.....	26
4.1. Общая математическая постановка задачи	26
4.2. Дипольный момент диэлектрического шара, помещенного во внешнее однородное электрическое поле	26
4.3. Изменение сопротивления между двумя сферическими электродами при внесении в окружающую среду третьего сферического тела	28

4.4. Формула для изменения сопротивления сплошной среды при внесении в нее проводящего шара	30
4.5. Экспериментальное исследование изменения сопротивления сплошной среды для развитой теории	32
ВЫВОДЫ	35
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	37
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	39

ВВЕДЕНИЕ

Измерение слабых электрических полей представляет сложную проблему. Источниками таких полей могут быть как технические устройства и приборы, так и биологические объекты. Существует целый ряд различных методов измерения напряженности электрических полей [1-2]. Данная диссертация посвящена электрорезистивному методу

Электрорезистивный метод регистрации неоднородностей в проводящих и слабопроводящих средах широко используется, прежде всего, при геологических изысканиях [3-5]. Хорошо известен метод вертикального электростатического зондирования, который позволяет определять расположение различных пластов в грунте, которые обладают различным удельным сопротивлением [6-10]. На практике хорошо удается определить расположение нескольких слоев в грунте на глубине до нескольких сотен метров. Также этот метод использовался для выявления в земном грунте археологических объектов [5], а также для обнаружения в земле объектов инфраструктуры, таких как трубопроводы, кабели и прочие индустриальные объекты [8].



Рисунок 1 - Принципиальная зависимость удельного электрического сопротивления горных пород от пористости.

В данной работе производится попытка развития идеи электрорезистивного метода для регистрации движущихся объектов в проводящих средах, например регистрация движущейся пресноводной рыбы в воде, или регистрация движущихся диэлектрических и проводящих твердотельных объектов.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В СЛАБОПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ

Электрорезистивный метод зондирования проводящей среды, прежде всего, широко используется в геофизике [4-6]. Одной из наиболее распространенных форм электрического зондирования поверхностного слоя земли является метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Суть данного метода сводится к измерению сопротивления между двумя приемными электродами, которые находятся в электрическом поле, созданном двумя другими питающими электродами (см. рисунок 2)

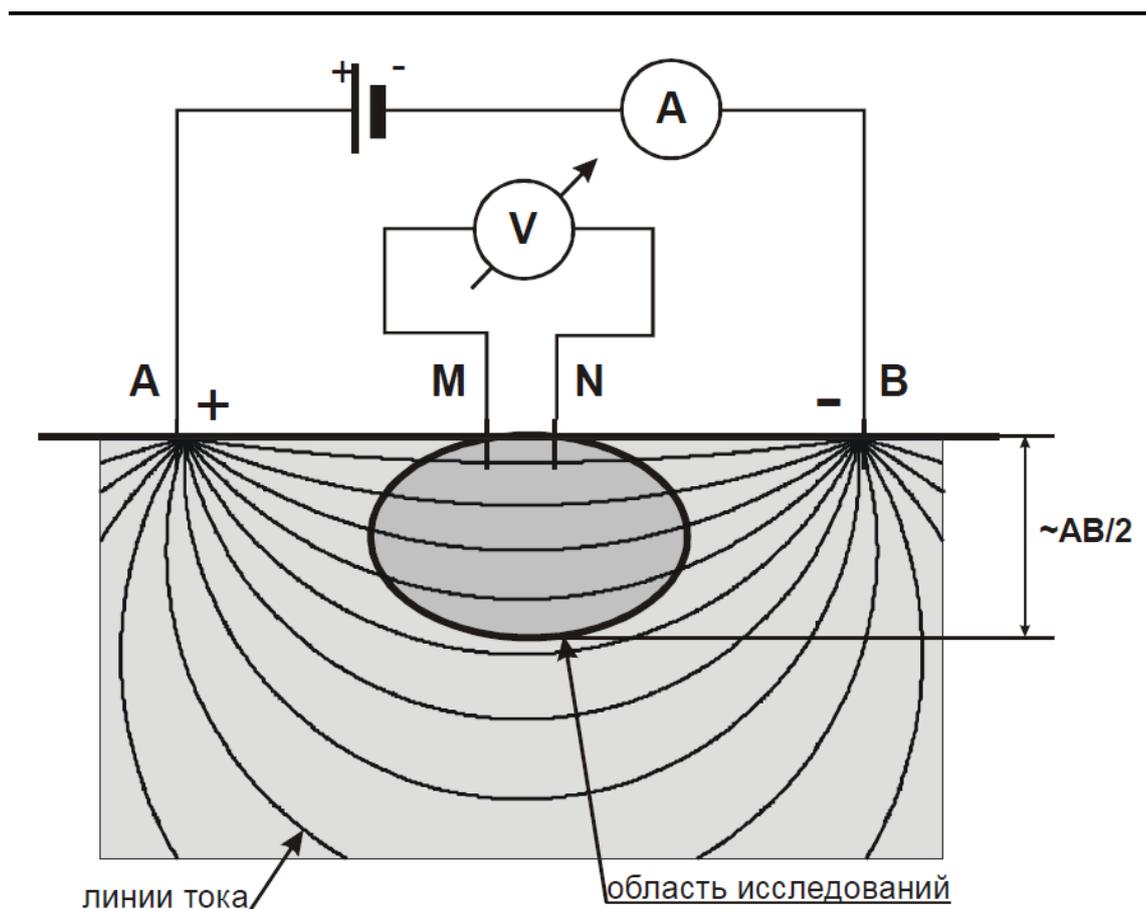


Рисунок 2 – Схема измерений в методе вертикального электростатического зондирования.

Измеряющие электроды по сути дела измеряют суммарное сопротивление среды между электродами, где создается распределенный ток в некотором объеме. Изменяя расстояние между электродами можно проводить измерения сопротивления все большего объема среды. В реальных условиях данный метод позволяет проводить до 2 км. Обычно данный метод позволяет зарегистрировать 2 или несколько слоев на поверхности земли с разными значениями удельных сопротивлений: Лессы (мелкодисперсионные осадочные породы), и граниты. Более точные методы позволяют регистрировать 3 слоя: известняки, глины, четвертичные отложения



Рисунок 3 – Пример 2-х слойной кривой метода ВЭЗ.

Видоизмененные методы электрического зондирования могут быть использованы и для регистрации в среде более сложных аномалий, например

использование метода электрической томографии [5,8]. Удалось обнаружить сложную трехмерную структуру поверхностного грунта и обнаружить останки древнего поселения, расположенного на окраине села Знаменского Одинцовского района Московской области, которые были подтверждены при дальнейших раскопках.

Данный метод эффективно используется также для обнаружения в поверхностных слоях грунта трубопроводов из различных материалов, тоннелей, старых кабелей, и прочих крупногабаритных артефактов.

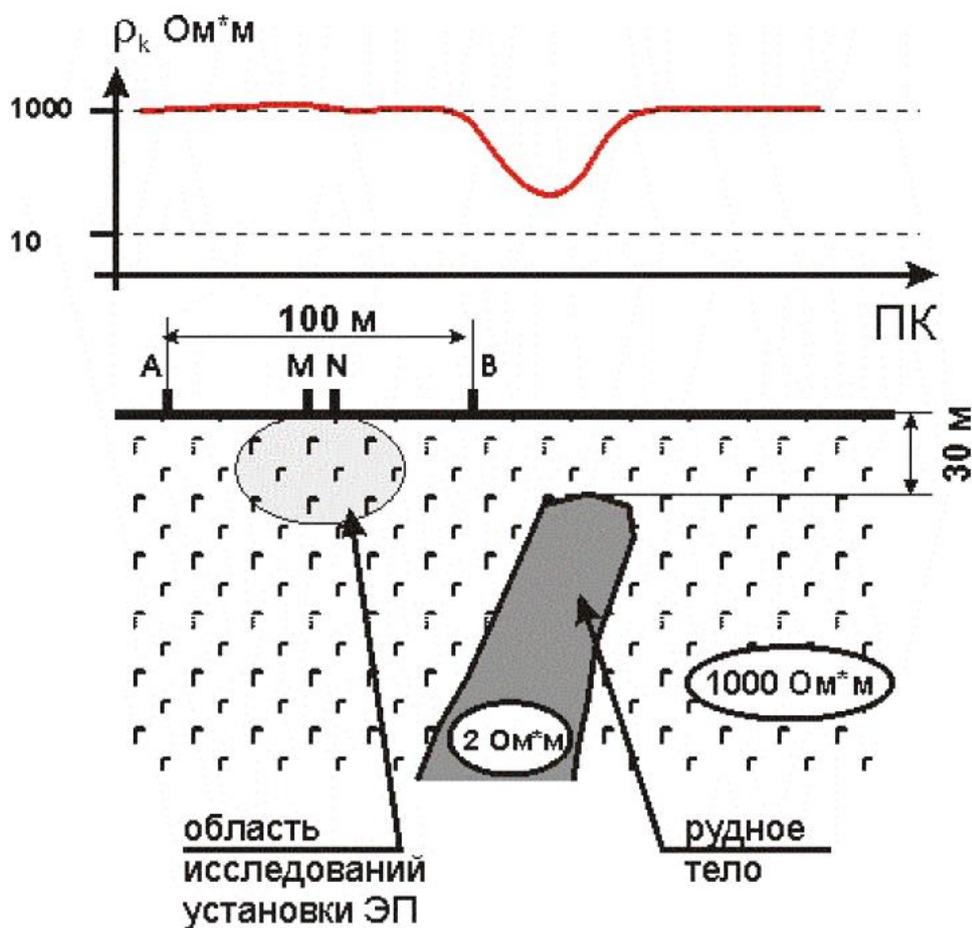


Рисунок 4 – Пример применения метода вертикального электростатического зондирования для поиска рудного тела.

Следует отметить, что приведенные методы электрического зондирования являются стационарными, то есть исследования с их помощью представляют собой достаточно длительные полевые работы, и данные методы позволяют обнаружить только стационарные объекты.

В данной работе разработана видоизмененный метода электрического зондирования, позволяющая делать измерения в проводящих или слабопроводящих средах (например, в дистиллированной или естественной пресной воде) нестационарных трехмерных объектов, например появление рыбы в области измеряемых электродов, который позволяет регистрировать объекты как диэлектрические, так и проводящие на достаточном расстоянии от измерительных электродов. Более того, этот метод позволяет регистрировать изменение форм находящихся в чувствительной области объектов, например движение хвоста или плавников рыбы. Другой особенностью данного метода является использование только двух электродов, которые выполняют как роль питающих, так и роль измерительных электродов. Также особенностью данного метода является определение колебаний поверхности проводящей среды, даже незначительных амплитуд. Таким образом, данный метод предлагает возможность электрического зондирования для изучения нестационарных процессов.

Следует отметить, что теоретический расчет изменения сопротивления среды при нахождении в нем трехмерного объекта предполагает решение сложной трехмерной электростатической задачи, т.е. представляет собой решение уравнения Пуассона, т.е. уравнение эллиптического вида при наличии граничных условий для как минимум трех объемных тел произвольной формы. Решение таких задач возможно только численным методом, и даже для численных решений является нетривиальной задачей, и поэтому в практических условиях практически неприменимо. В связи с этим практические методы сопровождаются применением упрощенных методов и моделей. В данной работе разработана аналитическая теория решения указанной задачи для электродов сферической формы и трехмерного объекты также сферической формы. В этом случае для бесконечной среды удалось найти приближенное аналитическое решение указанной электростатической задачи и найти полное электрическое сопротивление между электродами в зависимости от расположения относительно питающих электродов третьего

объекта в виде шара. Получены соответствующие аналитические формулы и сконструирована установка и проведены экспериментальные измерения для измерения электрического сопротивления при приближении шара к питающим сферическим электродам. Результаты эксперимента с высокой точностью совпали с результатами теоретических расчетов.

2. РЕГИСТРАЦИЯ ДВИЖУЩЕЙСЯ РЫБЫ В ВОДЕ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОДОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ.

В жизни живых организмов электрические поля играют большую роль. Слабые электрические сигналы возникают в живых организмах вследствие процессов жизнедеятельности – при сокращении мышц, работе нервной системы, биении сердца [11-14]. Эти поля являются низкочастотными, их интенсивность на различных участках организма различается.

В том случае, когда в качестве исследуемых объектов выступают рыбы, измерения электрических полей сложнее, так как измерения приходится проводить в воде. Некоторые виды рыб генерируют собственные электрические поля для защиты, нападения, ориентации, внутривидовой коммуникации [12-13]. В данной работе в качестве биологического объекта взят африканский клариевый сом (*Clarias gariepinus*). В настоящее время существует несколько способов измерения электрических сигналов, генерируемых живыми организмами. Для подобных измерений чаще всего используют специальные датчики, которые вживляются в тело исследуемого объекта. Помимо этого, существовали успешные попытки бесконтактного измерения электрических сигналов, возникающих в процессе жизнедеятельности биологических объектов [15-25].

2.1. Описание экспериментальной установки и метод измерения

В качестве датчика, регистрирующего изменение электрического поля, был использован цилиндр из проводящей сетки (цилиндр Фарадея). Цилиндр установлен внутри пластиковой трубы, закрытой с одного конца, и помещен в аквариум. Используемый в эксперименте аквариум 30 л оснащен фильтром AQUAEL FAN-mini plus; использовались кондиционеры для воды AquaSafe и EasyBalance Tetra. С одного края в сетке сделано отверстие, размещенное под дополнительной трубкой, через которую внутрь цилиндра поступает корм для

рыбы. В качестве приманки используется корм TetraMin. Клариевый сом заплывал внутрь цилиндра Фарадея через открытый конец трубы. Электрический сигнал, вызванный движением клариевого сома *Clarias gariepinus*, регистрируется сеткой и передается на считывающее устройство (рисунок 5).

В качестве считывающего устройства используется Picoscope 5442A. С помощью программы Picoscope 6 полученные сигналы в графическом виде отображаются на мониторе. Для заземления использовалась металлическая сфера, размещенная в этом же аквариуме с противоположной от датчика стороны.

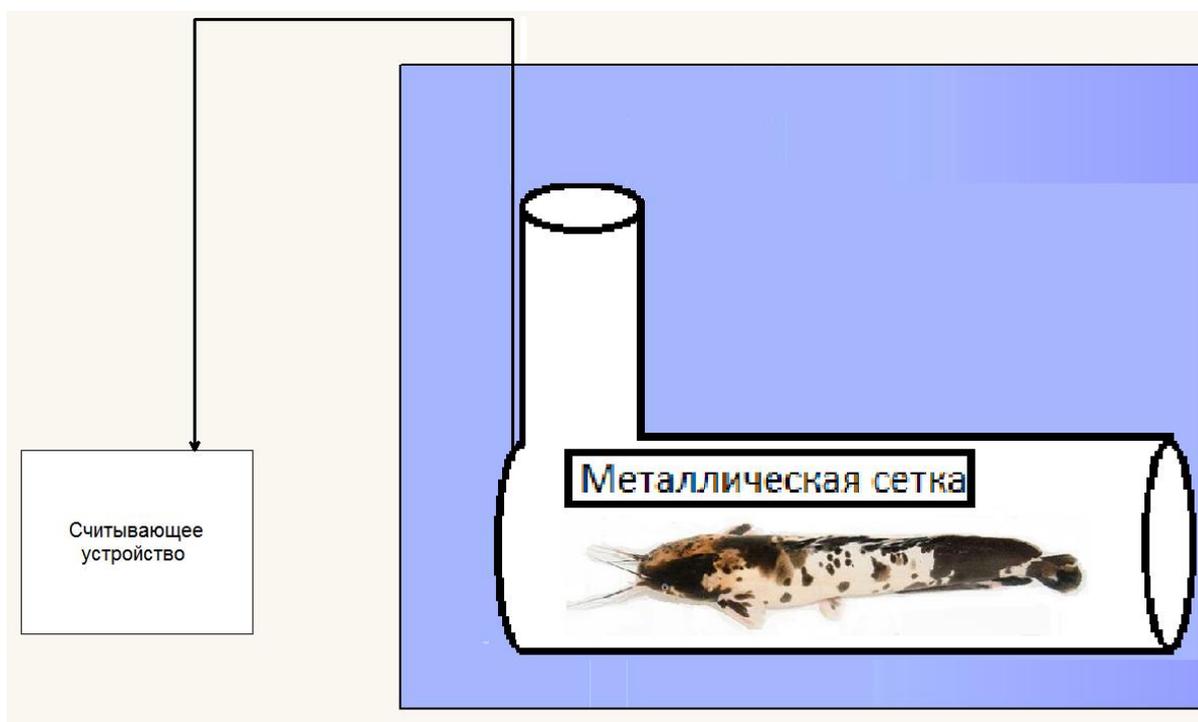


Рисунок 5 – Схема установки.

На этом принципе были созданы четыре установки, отличающиеся по типу сетки и способу регистрации и обработки сигнала. В первой установке использовалась сетка из железа, на этой установке были получены первые данные. Но от данного варианта пришлось отказаться в связи с низкой коррозионной стойкостью железа.

Во второй установке сетка была сделана из латуни. Результаты, получаемые данной установкой, мало отличались от тех, которые были получены с помощью железной сетки.

В третьей установке были использованы две цилиндрические сетки из латуни, между которыми оставалось свободное пространство. Сигналы с цилиндров передавались на дифференциальный усилитель, а с него сигнал шел на считывающее устройство Picoscope 5442A.

В четвертой установке были использованы две медные трубки, которые были полностью изолированы от проводящей среды. Также отсутствовал непосредственный контакт наружного покрова рыбы с проводящими трубками.

2.2. Результаты измерений электрического поля, возникающего при появлении клариевого сома в области чувствительности электродов.

При использовании железной сетки в качестве электрода, были получены качественные сигналы, приведенные на рисунке 6. и рисунке 7. В первом случае был включен аквариумный фильтр (рисунок 6), на картине присутствуют помехи с амплитудой 0.4 мВ. Амплитуды электрических сигналов при появлении клариевого сома составляли от 0.1 мВ до 0.3 мВ. Во втором случае (рисунок 7) при снятии сигналов аквариумный фильтр был выключен, помехи отсутствуют. Амплитуда полученного сигнала так же не превышает 0.3 мВ.

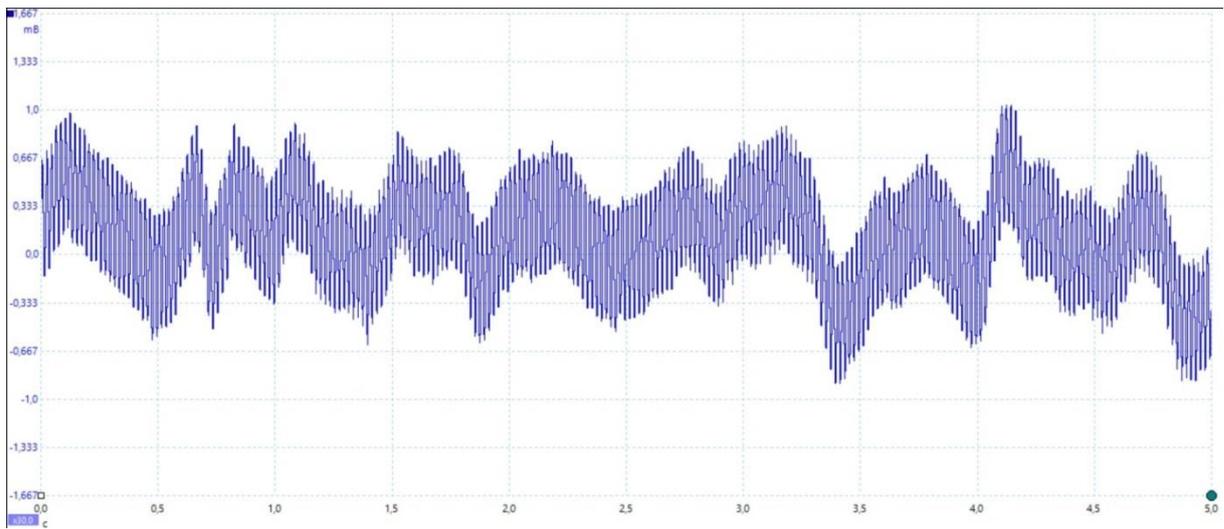


Рисунок 6 – Сигнал, полученный с помощью установки с одним цилиндром из железной сетки при включенном аквариумном фильтре.

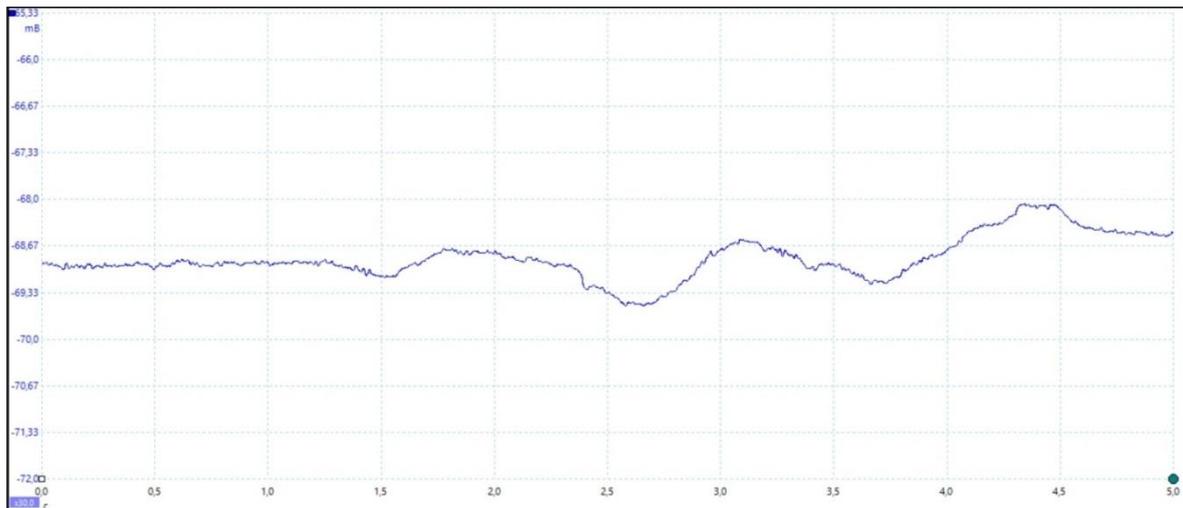


Рисунок 7 – Сигнал, полученный с помощью установки с одним цилиндром из железной сетки при выключенном аквариумном фильтре.

Результаты, полученные с помощью второй установки с латунной сеткой, мало отличаются от предыдущих (рисунки 8,9). Амплитуда регистрируемого сигнала не превышает 0.8 мВ.

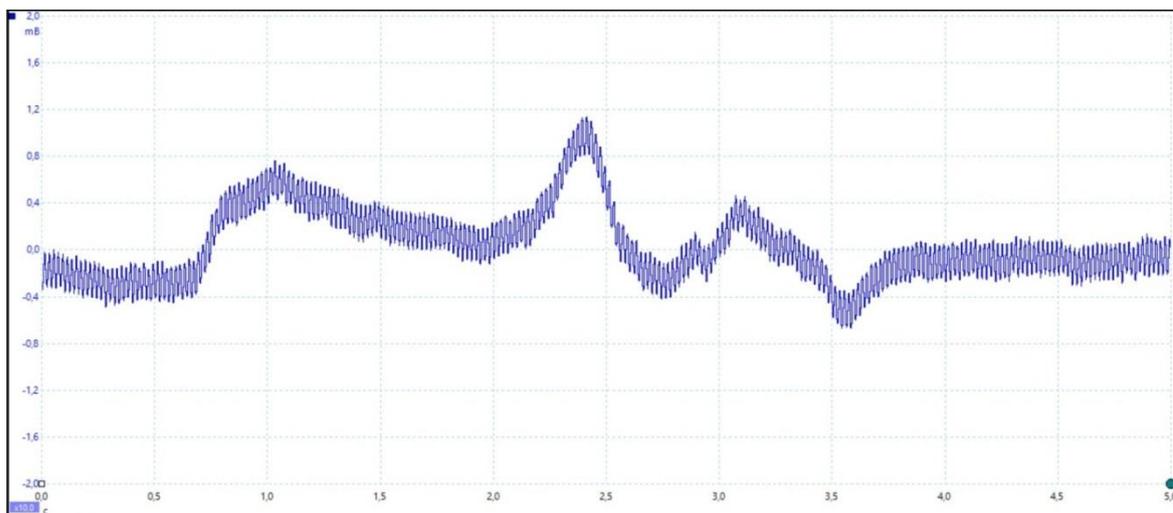


Рисунок 8 – Сигнал, полученный с помощью установки с одним цилиндром из латунной сетки при включенном аквариумном фильтре.

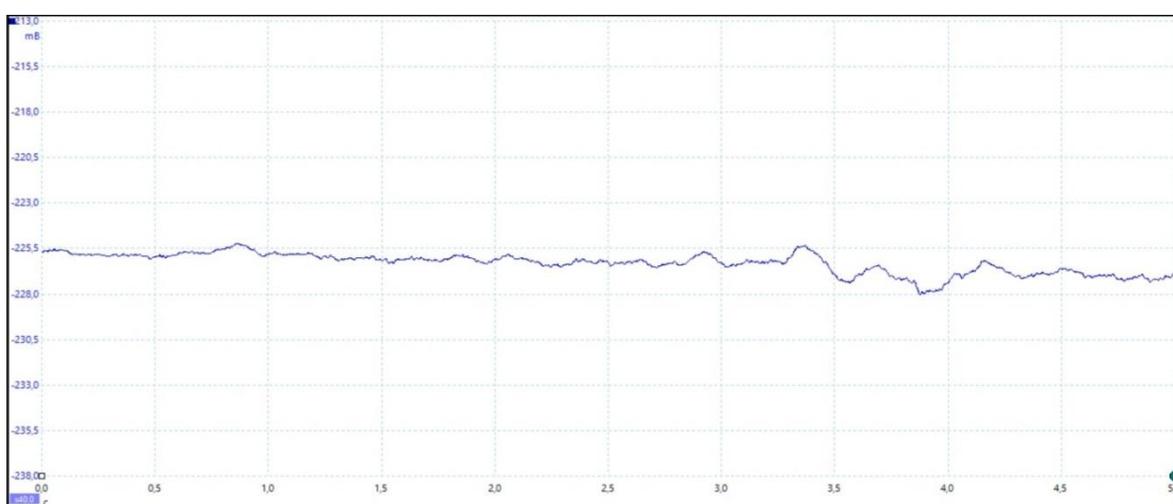


Рисунок 9 – Сигнал, полученный с помощью установки с одним цилиндром из латунной сетки при выключенном аквариумном фильтре.

С помощью третьей установки, удалось получить качественный сигнал с амплитудой в несколько десятков милливольт (рисунки 10, 11).

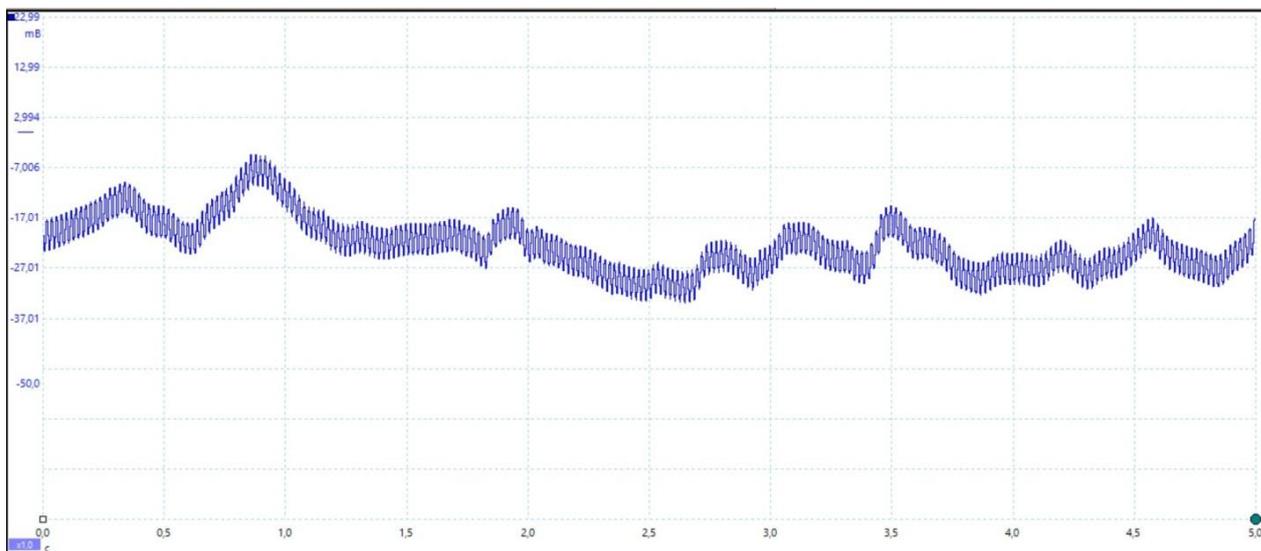


Рисунок 10 – Сигнал, полученный с помощью установки с двумя проводящими сетками при включенном аквариумном фильтре.

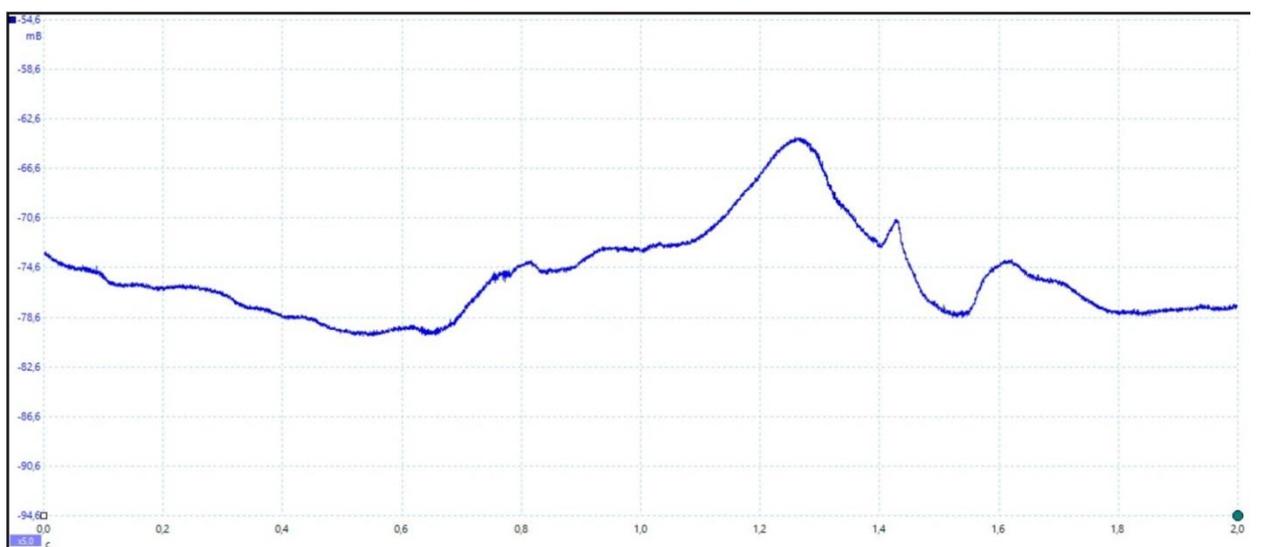


Рисунок 11 – Сигнал, полученный с помощью установки с двумя проводящими сетками при выключенном аквариумном фильтре.

Результаты последнего эксперимента приведены на рисунке 12. В последней установке обе медные трубки были изолированы. В этом случае сигнал при заплывании рыбы в экспериментальную установку не фиксировался.

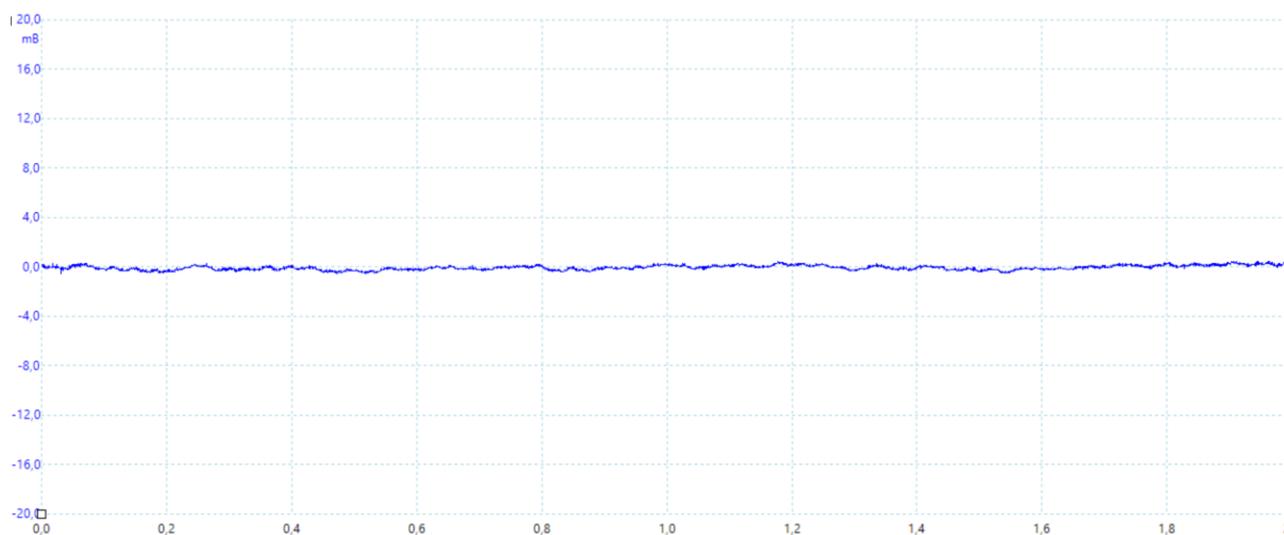


Рисунок 12 – Сигнал, полученный с помощью установки с двумя изолированными проводящими сетками при включенном аквариумном фильтре.

2.3. Анализ полученных экспериментальных результатов

Возникновение электрического сигнала при заплывании рыбы в цилиндрическое регистрирующее устройство (цилиндр Фарадея) может быть обусловлено различными причинами. В работах Ольшанского и др. [11-13] описывается регистрация электрического сигнала, который Клариевый сом генерировал сам посредством специального электрического органа, который является источником достаточно высокого напряжения, достигающего значений до 1200 Вольт. В нашем случае была проведена серия дополнительных исследований, в результате которых было установлено, что сом перестает быть источником электрического поля, если электроды цилиндрических детекторов и подводящие к ним провода будут тщательно изолированы от проводящей среды — воды (см. рисунок 12). Если бы сом вырабатывал высокое электрическое напряжение, это не помешало бы детектирующим электродам зарегистрировать сигнал через слои диэлектрической оболочки. С другой стороны, в предыдущих экспериментах было установлено, что сигнал возникает не только при движении рыбы, но и при колебаниях самого цилиндрического детектора, а также при внесении внутрь цилиндра руки. В дальнейшем тщательное исследование

регистрирующего устройства, в частности дифференциального усилителя, показали, что электроды усилителя сами подают небольшое электрическое напряжение на цилиндры измерительных электродов и заземление. Величина этого напряжения небольшая – 1,5 мВ. Однако этого было достаточно, чтобы в среде возник распределенный электрический ток. Величина напряжения на электродах определяется результирующим сопротивлением сплошной среды, которое меняется при перемещении рыбы или других объектов из одной части аквариума в другую. В результате это приводило к изменению напряжения на электродах при проплывании рыбы в цилиндрической трубе. Таким образом, источником электрического сигнала рыбы являлся наведенный электрический заряд от распределенных токов, протекающих в сплошной среде, как это происходит в методе электростатического зондирования [5,8]. В связи с данными фактами, у нашей научной группы появилась идея подобрать такую конфигурацию двух электродов, соединенных с внешней ЭДС последовательно через дополнительное сопротивление, которое в свою очередь было подобрано оптимальным образом для наилучшей регистрации изменения сопротивления сплошной проводящей среды (воды). Экспериментальная реализация этой идеи представлена в следующей главе.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ РЕГИСТРАЦИИ ОБЪЕКТОВ В ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ ПО ИЗМЕНЕНИЮ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕДЫ

Известны два типа датчиков, способных регистрировать объекты в проводящих жидких средах — оптические и ультразвуковые [26-29].

Оптические датчики применимы только в области прозрачных сред, ультразвуковые датчики хорошо работают в том случае, когда плотности детектируемых объектов существенно отличаются от плотности окружающей проводящей среды. Для многих видов водной фауны плотность тела близка к плотности воды, что затрудняет их ультразвуковую регистрацию. Оптические датчики плохо работают в мутных жидкостях и на больших расстояниях. Что касается детектирования уровня жидкости, то кроме указанных методов используются механические датчики (поплавки) и емкостные датчики [30].

В данной главе предлагается иной способ детектирования объектов в жидкой среде, а также регистрации колебаний поверхности жидкости, основанный на изменении сопротивления жидкой среды в пространстве между электродами при движении объекта относительно них. Также этот способ удобен для регистрации уровня жидкости и колебаний ее поверхности.

3.1 Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка представляет собой два электрода в виде тонких медных пластин размерами 2–3 см, закрепленных на текстолитовой (эбонитовой) рейке. Электроды замыкались на гальванический элемент с ЭДС 1,5 В, соединенный последовательно с переменным сопротивлением (20 кОм). С электродов снималось напряжение, которое подавалось на дифференциальный усилитель и далее усиленная разность потенциалов между электродами измерялась при помощи чувствительного цифрового осциллографа. Схема установки представлена на рисунке 13.

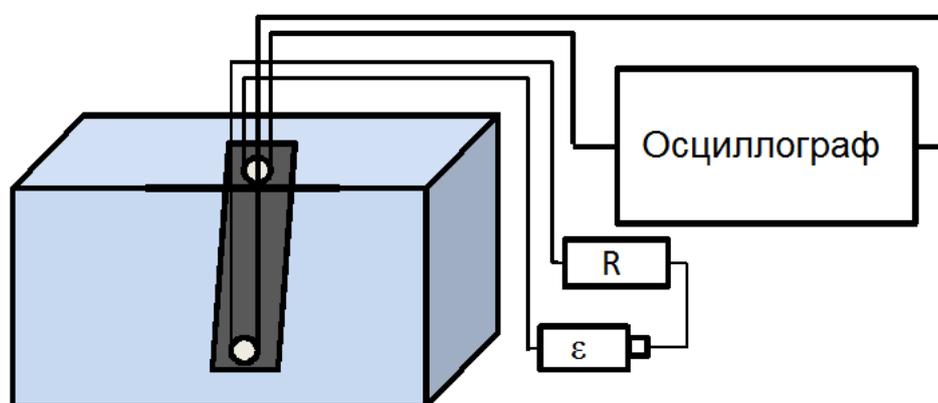


Рисунок 13 – Схема установки.

3.2 Эксперимент по электрорезистивной регистрации колебаний поверхности жидкости

Эксперимент проводился в прямоугольной емкости вместимостью 5 л, которую заполняли дистиллированной и водопроводной водой. Один из электродов помещался в жидкость полностью, второй частично. Значение переменного сопротивления R подбиралось таким образом, чтобы оно в два-три раза превосходило полное сопротивление жидкости между электродами. Тогда при малейшем колебании поверхности жидкости на осциллографе фиксировался сигнал, соответствующий изменению сопротивления жидкой среды (см. рисунок 14).

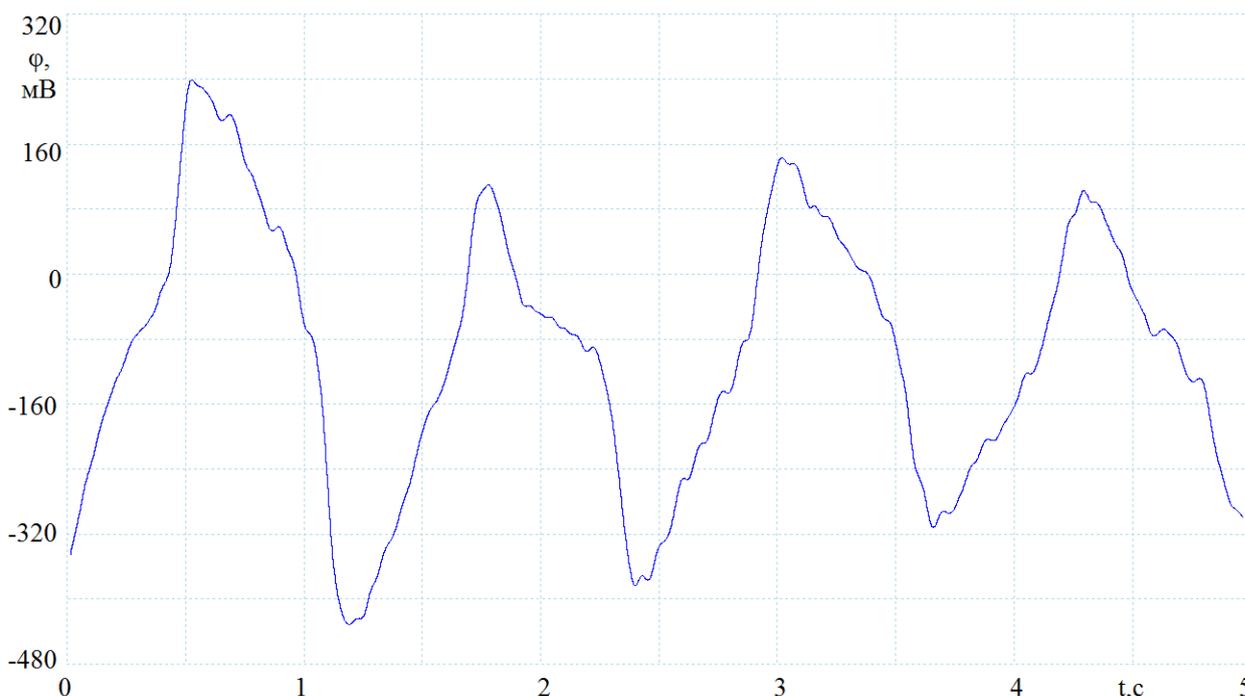


Рисунок 14 – Колебания поверхности жидкости. Один электрод погружен полностью, второй частично. Максимальная амплитуда сигнала составляет 330 мВ. Отчетливо видно, что амплитуда сигнала уменьшается с уменьшением амплитуды возмущений поверхности жидкости.

При полном погружении электродов также регистрировались колебания поверхности жидкости, но сигнал был значительно слабее, так как изменение сопротивления было значительно меньше. При погружении в жидкость металлического и диэлектрического объектов и их движении вблизи электродов (без видимого возмущения колебаний поверхности жидкости) устройство фиксировало движение этих объектов, в том числе и на заметном расстоянии от электродов. При этом регистрируемый сигнал был заметно слабее. Характерный вид сигнала представлен на рисунке 15 и соответствует механическим колебаниям (движению) объектов в среде.

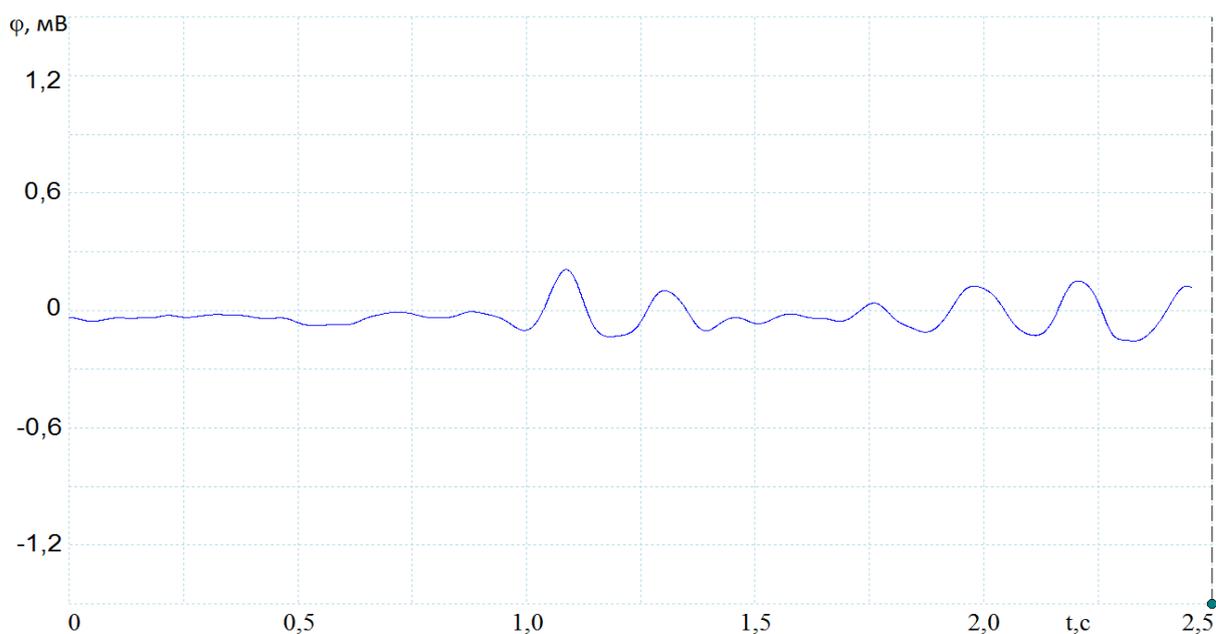


Рисунок 15 – Колебания сигнала при движении металлической пластины в жидкости. Оба электрода полностью погружены в воду.

3.3. Электрорезистивный метод регистрации движущегося объекта в проводящей среде

Следующий эксперимент был поставлен с биологическим объектом в большом аквариуме прямоугольной формы объемом 80 л. В аквариуме находились водоросли и одна особь *Clarius gariepinus* (клариевый сом). Электроды были полностью погружены в воду. При движении сома вблизи электродов фиксировался электрический сигнал, изменяющийся во времени в соответствии со скоростью движения рыбы. Амплитуда сигнала зависела от расстояния от электродов до места нахождения сома. Характерный вид регистрируемых сигналов приведен на рисунках 16-20.

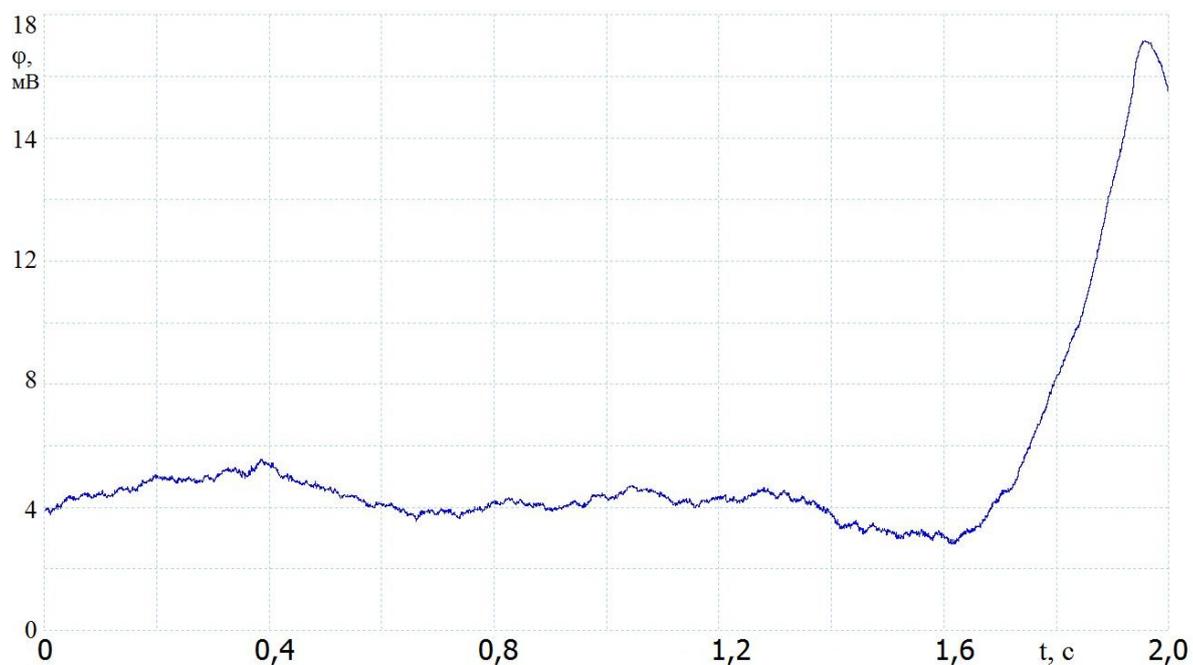


Рисунок 16 – Показания колеблются в диапазоне 35 мВ. Рыба резко проплывает в непосредственной близости от планки, в результате чего показания быстро растут, достигая пикового значения 17 мВ.

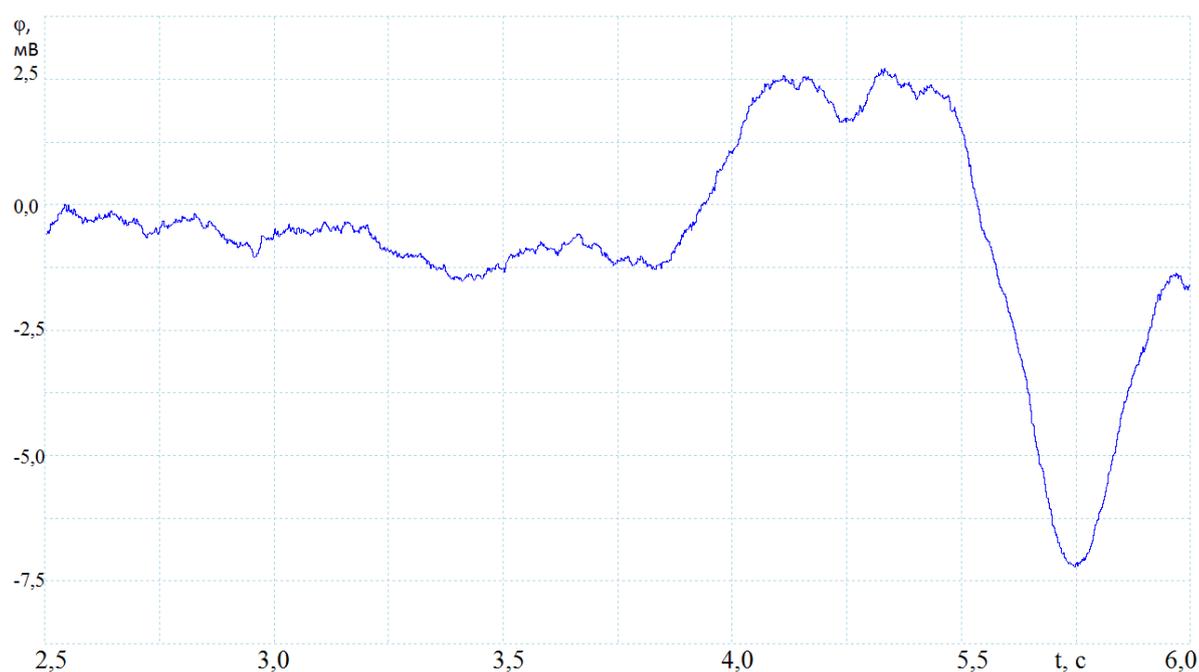


Рисунок 17 – Показания колеблются в диапазоне -2–0 мВ. Рыба проплывает на расстоянии около 5 см от планки. Отчетливо видна активная фаза работы хвостом, рыба ускорила и немного приблизилась к планке.

Показания при этом колеблются в диапазоне от -7,4 мВ до 2,5 мВ



Рисунок 18 – Показания колеблются в диапазоне -0,5–0,2 мВ. Рыба быстро проплывает на расстояние и около 3 см от планки. При этом Разность потенциалов между электродами повышается до значения 7,2 мВ.

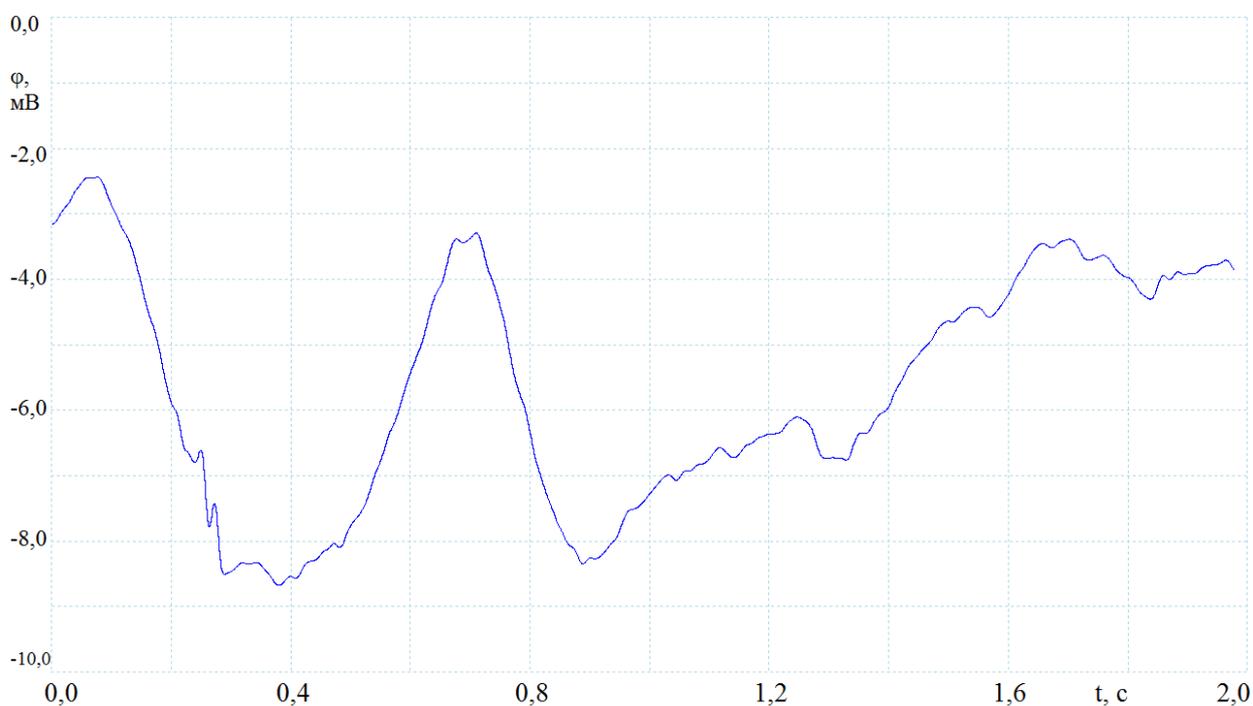


Рисунок 19 – Рыба плавает на расстоянии 3–8 см от планки. Показания колеблются в диапазоне -8,5–2,5 мВ.

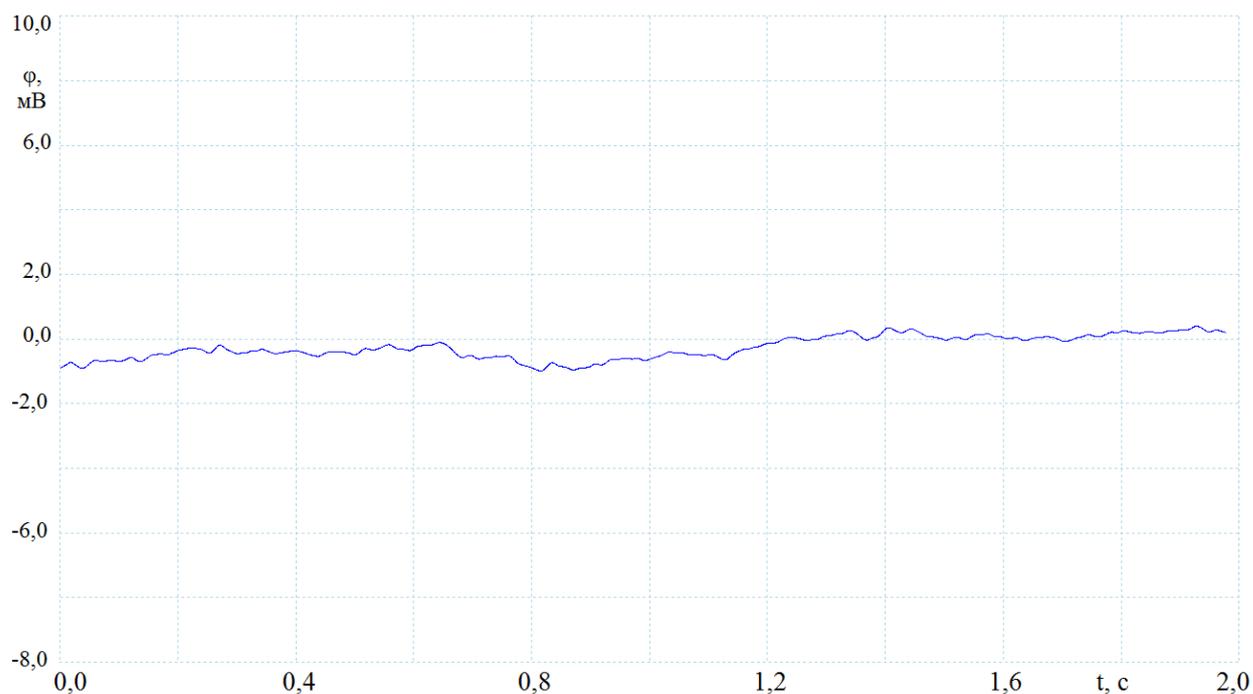


Рисунок 20 – Рыба плавает на расстоянии 15–25 см. При этом показания устройства колеблются в диапазоне -1–0,5 мВ.

Сигнал также регистрировался в том случае, если за счет внешних воздействий возникало колебание водорослей или поверхности воды в аквариуме.

3.4 Вывод

Таким образом, предложен иной метод, позволяющий регистрировать в воде или другой проводящей жидкости движущиеся тела, в том числе и биологические. В области чувствительности рассмотренных электродов возможно регистрировать приближение, удаление, или движение этих объектов (например, фиксировать появление рыбы). Этот метод может быть использован также как иной метод измерения уровня колебаний проводящей жидкости, например, амплитуды волнения на поверхности водоемов или морских акваторий.

4. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНОГО МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ ОБЪЕМНОГО ТЕЛА В ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ

4.1. Общая математическая постановка задачи

Для того чтобы рассчитать сопротивление между двумя электродами к которым приложена заданная разность потенциалов U при перемещении в среде третьего объемного тела (проводника или диэлектрика), необходимо решить электростатическую задачу для трех заряженных тел в слабопроводящей среде. Эта электростатическая задача в общем случае сводится к решению трехмерного уравнения Лапласа при соблюдении граничных условий на поверхности каждого из этих трех тел. Например, если все тела являются проводниками, то общая постановка задачи нахождения электрического потенциала φ в проводящей среде сводится к решению следующей граничной задачи.

$$\Delta\varphi = 0, \quad (1)$$

$$\varphi|_{\Sigma_i} = \varphi_i, \Delta\varphi = 0, \quad (2)$$

Где индекс $i=1,2,3$ обозначает нумерацию электродов и регистрируемого тела, Σ_i – поверхность i -го тела, φ_i – постоянное значение потенциала i -го тела.

Решение такой трехмерной задачи Дирихле эллиптического уравнения представляет собой сложную численную задачу, решение которой представляет самостоятельный теоретический интерес. В связи с этим в данной работе разработана приближенная теория решения такой задачи для трех тел сферической формы.

4.2. Дипольный момент диэлектрического шара, помещенного во внешнее однородное электрическое поле

Рассмотрим задачу о поляризации диэлектрического шара с диэлектрической проницаемостью ε_1 в среде с диэлектрической

проницаемостью ε_2 и в постоянном электрическом поле E_0 . На рисунке 21 представлен характерный вид линий напряженности электрического поля диэлектрического шара [31].

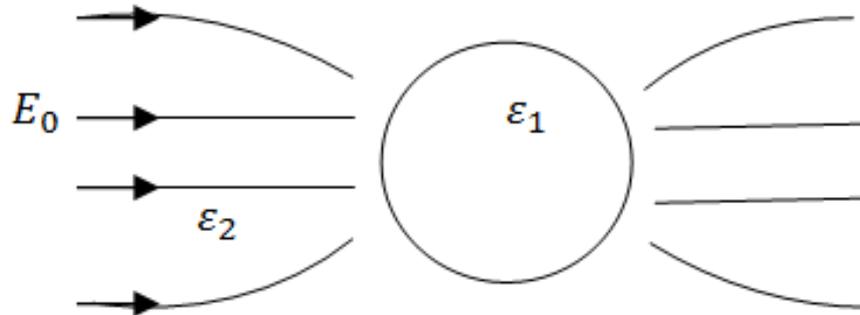


Рисунок 21 – Характерный вид линий напряженности электрического поля диэлектрического шара, помещенного в однородное электрическое поле E_0 .

Пусть вектор поляризации среды \bar{P}_1 , шара \bar{P}_2 . Рассмотрим комбинированную среду P_1 и эффективным шаром с вектором поляризации $\bar{P} = \bar{P}_1 - \bar{P}_2$. Поле внутри шара $E = E_0 - E'$, где

$$\bar{E}' = \frac{1}{3\varepsilon_0\varepsilon_1}(\bar{P}_1 - \bar{P}_2) = \frac{1}{3\varepsilon_0\varepsilon_1}(\varepsilon_0\kappa_1\bar{E} - \varepsilon_0\kappa_2\bar{E}) = \frac{1}{3}\left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}\right)\bar{E}. \quad (3)$$

Из этого соотношения находим:

$$\varepsilon_2 E' = \frac{1}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(E_0 - E'). \quad (4)$$

Приводя подобные члены получим:

$$E' \left(\varepsilon_2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \right) = \frac{1}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)E_0 \quad (5)$$

или

$$E' = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)E_0}{2\varepsilon_2 + \varepsilon_1}. \quad (6)$$

Тогда для вектора поляризации шара найдем:

$$\begin{aligned} \bar{\mathcal{P}} &= \bar{\mathcal{P}}_1 - \bar{\mathcal{P}}_2 = \varepsilon_0(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(E_0 - E') = \varepsilon_0(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \left(E_0 - \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)E_0}{2\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \right) = \\ &= \varepsilon_0 \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2\varepsilon_2 + \varepsilon_1} 3\varepsilon_2 E_0 = 3\varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2\varepsilon_2 + \varepsilon_1} E_0. \end{aligned} \quad (7)$$

Дипольный момент шара \bar{p} будет равен:

$$\bar{p} = \frac{4}{3}\pi R^3 \bar{\mathcal{P}} = 4\pi R^3 \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \bar{E}_0. \quad (8)$$

Таким образом, диэлектрический шар с диэлектрической проницаемостью ε_1 помещенный в однородную среду с диэлектрической проницаемостью ε_2 во внешнем электрическом поле E_0 приобретет дипольный момент [31]

$$p = 4\pi R^3 \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2\varepsilon_2 + \varepsilon_1} E_0. \quad (9)$$

В частности если шар будет проводником, для которого можно считать диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_1 \rightarrow \infty$, то его дипольный момент будет равен

$$p = 4\pi R^3 \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_0. \quad (10)$$

4.3. Изменение сопротивления между двумя сферическими электродами при внесении в окружающую среду третьего сферического тела

Рассмотрим 2 одинаковых сферических металлических электрода, подключенных к источнику ЭДС (см. рисунок 22). Пусть на один электрод перетек электрический заряд $-q$, на другой - $+q$.

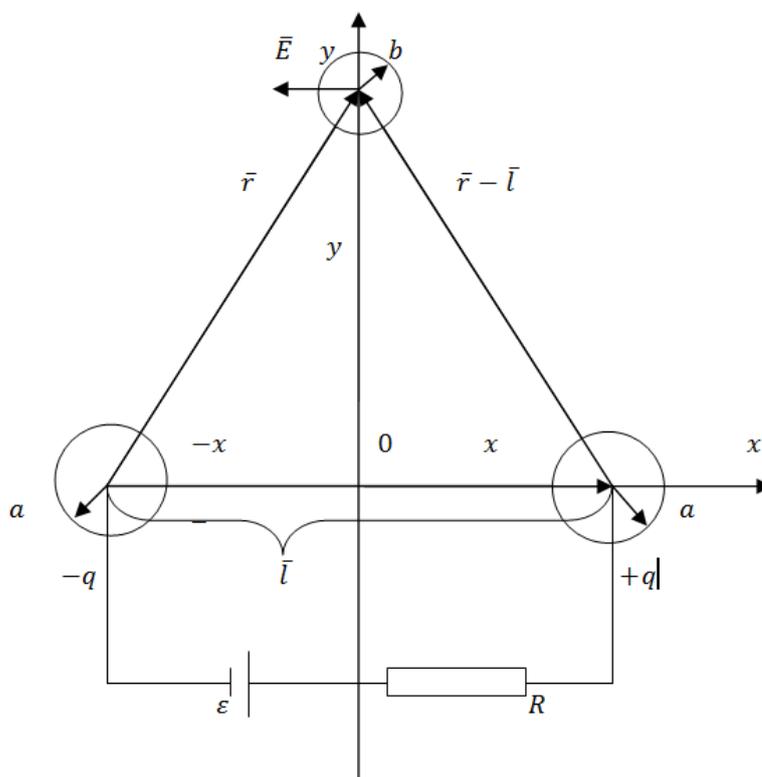


Рисунок 22 – Схема расположения электродов и третьего шара.

Тогда электрическое поле в области третьего шара \vec{E}_0 создаваемое этими зарядами будет определяться законом Кулона (см. обозначения величин на рисунке 22):

$$\vec{E}_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_2} \left(-\frac{q\vec{r}}{r^3} + q \frac{(\vec{r}-\vec{l})}{|\vec{r}-\vec{l}|^3} \right). \quad (11)$$

Если считать это поле в области третьего шара практически однородным, то оно будет индуцировать на этом шаре электрический дипольный момент, полученный в пункте 4.2.

$$\vec{p} = 4\pi R^3 \epsilon_0 \epsilon_2 \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{2\epsilon_2 + \epsilon_1} \vec{E}_0. \quad (12)$$

Дипольный момент этого шара будет создавать в области первого и второго электродов электрические потенциалы φ'_1 и φ'_2 , определяемые формулами

$$\varphi'_1 = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_2} \frac{\vec{p}\vec{r}}{r^3}, \quad \varphi'_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_1} \frac{\vec{p}(\vec{l}-\vec{r})}{|\vec{l}-\vec{r}|^3}. \quad (13)$$

Вследствие того, что шаровые электроды подключены к источнику постоянного напряжения, заряды на шарах должны измениться на величины q_1 и q_2 , чтобы оставить неизменными значения потенциалов на этих электродах. Следовательно, имеем:

$$\frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_1a} - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_2} \frac{\vec{p}\vec{r}}{r^3} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{q_2}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_2a} + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_1} \frac{\vec{p}(\vec{l}-\vec{r})}{|\vec{l}-\vec{r}|^3} = 0. \quad (15)$$

Отсюда находим, что при внесении третьего шарика на электроды должен протечь дополнительный заряд с источника ЭДС q_1 и q_2 .

$$q_1 = \frac{a}{r^3} \vec{p}\vec{r}, \quad (16)$$

$$q_2 = -\frac{a}{|\vec{l}-\vec{r}|^3} \vec{p}(\vec{l}-\vec{r}). \quad (17)$$

Так как величина зарядов на каждом из двух электродов изменится при внесении третьего шара на значения, определяемые приведенными выше формулами, то изменится напряженность электрического поля в среде, а, следовательно, и электрический ток, протекающий от одного электрода к другому. Зная это изменение электрического тока можно определить результирующее изменение сопротивления всей среды при внесении в него третьего шарика.

4.4. Формула для изменения сопротивления сплошной среды при внесении в нее проводящего шара

Рассмотрим частный случай теории разобранный в пункте 4.3, когда третий шар помещается в плоскости симметрии между двумя шаровыми электродами (как показано на рисунке 22). В этом случае электрическое поле E_0 в центре третьего шара будет направлено против координатной оси Ox и будет равно (согласно общим формулам, полученным в пункте 4.3):

$$E_{0x} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_2} \left(-\frac{2qx}{(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}} \right). \quad (18)$$

Электрический дипольный момент также будет направлен против координатной оси Ox и будет равен:

$$p_x = 4\pi b^3 \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2} E_{0x} = -b^3 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2} \cdot \frac{2qx}{(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (19)$$

Этот электрический диполь приводит к изменению на электродах электрических зарядов на величину:

$$q_1 = q' = \frac{a}{r^3} (\vec{p} \cdot \vec{r}) = \frac{a}{r^3} p_x x = -\frac{ab^3}{r^3} x \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2} \cdot \frac{2qx}{r^3} = \quad (20)$$

$$-2 \frac{ab^3 x^2}{r^6} q \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2} = -2 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2} q \frac{ab^3 x^2}{(x^2+y^2)^3},$$

$$q_2 = -q'. \quad (21)$$

В случае, когда внесенный третий шар является проводником с $\varepsilon_1 \rightarrow \infty$:

$$q' = -2q \frac{ab^3 x^2}{(x^2+y^2)^3}. \quad (22)$$

Тогда заряд первого электрода будет равен:

$$q + q_1 = -q - 2q \frac{ab^3 x^2}{(x^2+y^2)^3} = -q \left(1 + 2 \frac{ab^3 x^2}{(x^2+y^2)^3} \right). \quad (23)$$

На втором шаре дополнительный заряд будет отличаться только знаком:

$$q_2 = -q_1. \quad (24)$$

Потенциалы первого и второго электродов относительно бесконечности будут равны:

$$\varphi_{1,\infty} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_2} \frac{q}{a}, \quad \varphi_{2,\infty} = -\varphi_{1,\infty}. \quad (25)$$

Тогда разность потенциалов между электродами будет определяться выражением:

$$U = \varphi_{1,\infty} - \varphi_{2,\infty} = 2\varphi_{1,\infty} = -2 \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_2} \frac{q}{a}. \quad (26)$$

Напряжение электрического поля вблизи первого электрода определяется его электрическим зарядом $(-q + q_1)$, то есть

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_2} \cdot \frac{q_1}{a^2}. \quad (27)$$

Тогда согласно дифференциальной форме закона Ома плотность электрического тока вблизи поверхности первого электрода будет равна

$$J = \frac{E}{\rho}. \quad (28)$$

Соответственно для полного электрического тока через сферическую поверхность электрода будет иметь

$$I = J \cdot S = J \cdot 4\pi a^2. \quad (29)$$

Принимая во внимание рассмотренные выше формулы для этого случая, получим связь между полным током и напряжением между электродами

$$I = \frac{E}{\rho} 4\pi a^2 = \frac{4\pi a^2}{\rho} \cdot \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_2} \cdot \frac{q}{a^2} \left(1 + 2 \frac{ab^3x^2}{(x^2+y^2)^3}\right) = \frac{4\pi a}{\rho} \cdot \frac{1}{2} U \left(1 + 2 \frac{ab^3x^2}{(x^2+y^2)^3}\right) = \frac{2\pi a}{\rho} \left(1 + 2 \frac{ab^3x^2}{(x^2+y^2)^3}\right) U = \frac{1}{R} \cdot U. \quad (30)$$

Где для сопротивления среды между двумя шаровыми электродами при наличии третьего металлического шара получим следующее выражение

$$R = \frac{\rho}{2\pi a \left(1 + 2 \frac{ab^3x^2}{(x^2+y^2)^3}\right)}. \quad (31)$$

В частности, для конкретного случая $a = b = 1$ см, $x = 3$ см, $y = 3$ см величина дополнительного слагаемого в выражении для сопротивления

$$2 \frac{ab^3x^2}{(x^2+y^2)^3} = 2 \cdot \frac{1 \cdot 1^3 \cdot 3^2}{(3^2+3^2)^3} = 2 \cdot \frac{9}{2^3 \cdot 9^3} = \frac{1}{18^2} = 0,003.$$

Если $y = 0$ см

$$2 \cdot \frac{ab^3x^2}{x^6} = 2 \cdot \frac{ab^3}{x^4} = 2 \cdot \frac{1 \cdot 1}{3^4} = \frac{2}{9^2} = \frac{2}{81} = 0,025;$$

4.5. Экспериментальное исследование изменения сопротивления сплошной среды для развитой теории

Для проверки разработанной выше теории было проведено экспериментальное исследование. Общий вид области, в которой проводились измерения, представлен на рисунке 23.

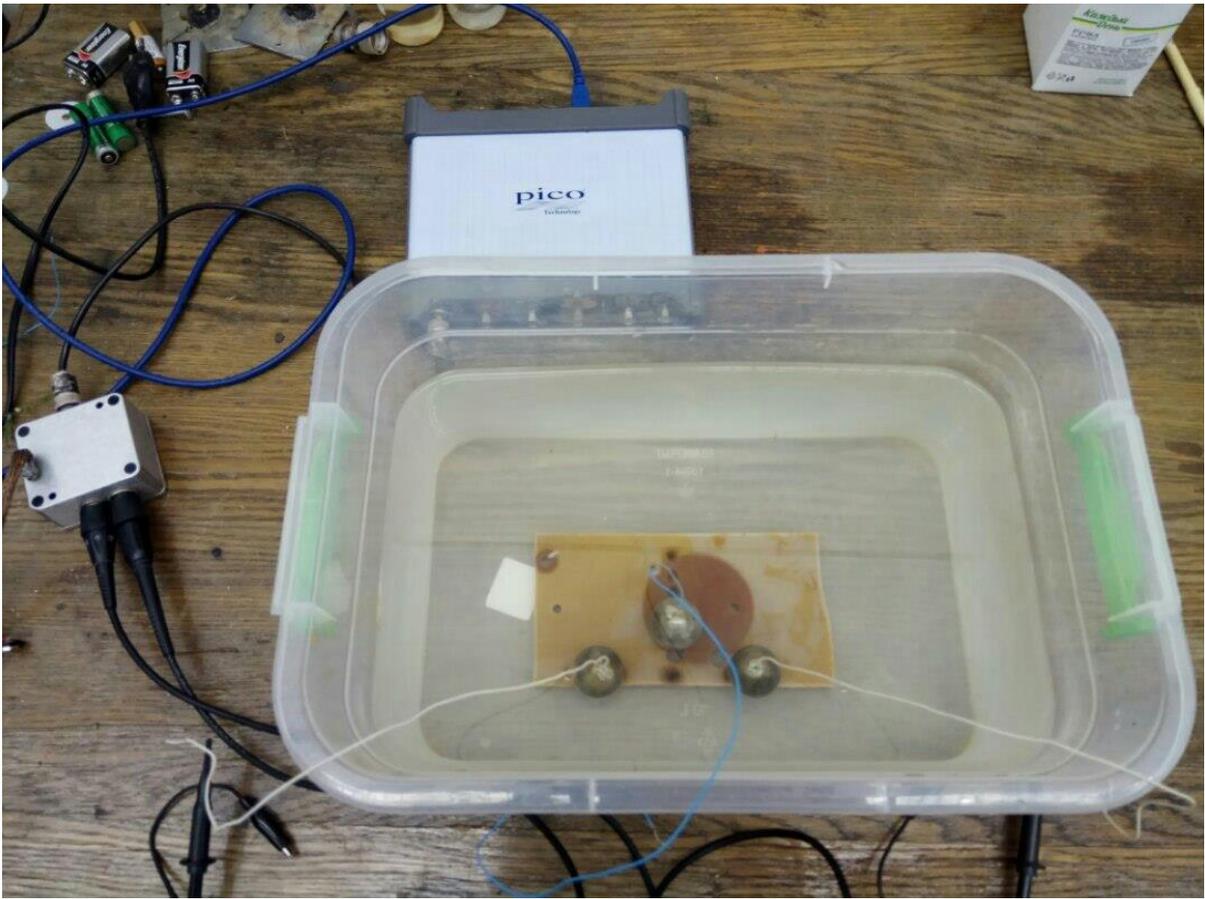


Рисунок 23 – Общий вид установки для исследования влияния шарового тела на сопротивление проводящей среды.

Установка состоит из емкости, в которую заливалась дистиллированная вода. На дно емкости помещалась пластинка из текстолита, на который помещались электроды диаметром 2,6 см. Третий шар помещался в плоскости симметрии между измерительными электродами. На электроды подавалось низкочастотное переменное напряжение с амплитудой 10 В, чтобы исключить осаждение на поверхности шарика продуктов электролиза, которые могут резко изменить сопротивление между шарами. Далее измерялся электрический ток, протекающий между электродами при различных положениях третьего шара. Далее вычислялось отношение сопротивления сплошной среды в отсутствие третьего шарика к сопротивлению среды при наличии третьего шарика

$$\frac{\rho}{2\pi a R} = 1 + 2 \frac{ab^3 x^2}{(x^2 + y^2)^3}. \quad (32)$$

На рисунке 24 представлена кривая, определяемая этой формулой, не которую нанесены экспериментально измеренные точки сопротивления среды.

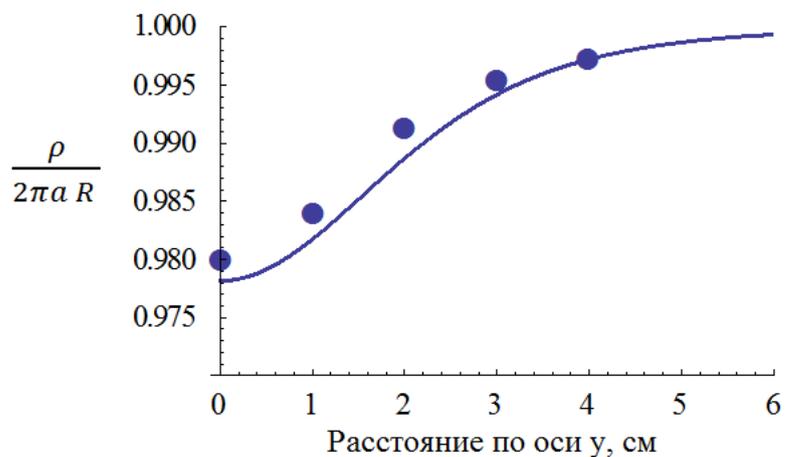


Рисунок 24 – График зависимости отношения сопротивления в отсутствии третьего шара к сопротивлению при наличии третьего шара в указанной координате.

Из приведенного графика следует хорошее соотношение эксперимента с развитой теорией.

ВЫВОДЫ

На основании изложенных в данной диссертации материалов можно сделать следующие выводы:

1. Разработан способ регистрации присутствия биологического объекта внутри экспериментальной установки, чувствительными элементами которой являлись электроды цилиндрической формы (цилиндры Фарадея). Величина напряжения на электродах определяется суммарным сопротивлением сплошной среды, которое изменяется при наличии в непосредственной близости от электродов прочих объектов с удельным сопротивлением отличным от удельного сопротивления среды. Таким образом, удалось зафиксировать изменение напряжения на электродах при проплывании рыбы внутри экспериментальной установки.
2. Источниками электрических полей могут служить и сами биологические объекты. В частности используемая в ходе работы особь – африканский клариевый сом, обладает электрическими органами, способными выступать в качестве источников высокого напряжения, вплоть до 1000 В. Помимо этого, электрические сигналы вырабатываются в ходе жизнедеятельности, в частности их источником служит нервная система объекта. Проведя дополнительный эксперимент, удалось убедиться в том, что эти сигналы не фиксируются измерительным устройством.
3. Предложен метод, позволяющий регистрировать колебания поверхности жидкости. Данный метод дает возможность определить не только факт наличия возмущений на поверхности жидкости, но и качественно установить их характер и амплитуду.
4. Предложен новый подход регистрации в воде или других слабопроводящих жидкостях движущихся объектов, в том числе и живых организмов (рыб). В отличие от метода, где электродами являются цилиндры Фарадея, здесь измерения проводятся при помощи электродов прямоугольной формы, что открывает большие возможности для практического применения данной

системы. В области чувствительности рассмотренных датчиков электрического поля возможно регистрировать приближение, удаление, или движение этих объектов (например, жидкости).

5. Разработана теория электрорезистивного метода регистрации объемного тела в проводящей среде. Получена формула для сопротивления среды между двумя шаровыми электродами при наличии третьего металлического шара. Представлено экспериментальное подтверждение данной теории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение приведем основные результаты в данной диссертации:

1. Разработана экспериментальная установка, позволяющая регистрировать в слабопроводящих средах (в воде) различные объекты, в том числе и живые организмы (рыб). В качестве регистрирующих элементов использовались цилиндры Фарадея.
2. Разработаны функционирующие схемы с одним и двумя цилиндрами Фарадея с использованием дифференциального усилителя для повышения чувствительности установки. Чувствительность установки составляла единицы мВ и позволяла уверенно регистрировать появление объекта в области цилиндров.
3. Создан новый способ электрорезистивного зондирования движущихся объектов в проводящих средах. Принципиальным отличием этого метода от аналогичного метода электростатического вертикального зондирования, широко применяемого, например, в геологии, является то, что в данном методе используются только 2 электрода, которые являются одновременно как источниками электрического поля, так и регистрирующими электродами.
4. Показано, что данный метод позволяет регистрировать изменения, происходящие на границе сред (колебания поверхности воды), так и движение объемного объекта, например, рыбы, вблизи электродов.
5. Найдено приближенное решение электростатической задачи Дирихле для граничных условий, обусловленных наличием в среде трех объемных тел (трех металлических шаров). Для частного случая расположения тел найдена приближенная аналитическая формула для изменения сопротивления сплошной среды.
6. Проведено экспериментальное исследование по измерению сопротивления сплошной среды при перемещении в среде одного из шаров. Получено хорошее соответствие развитой теории и эксперимента.

В заключение выражаю благодарность Николадзе Г.М. за помощь в проведении экспериментов и Громовой Е.С. за помощь в исследовании биологических объектов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бирюков С. В. Физические основы измерения параметров электрических полей: Монография //Омск: Изд-во СибАДИ, 2008.
2. Ластовецкий А. Е., Клепка С. П., Рябоконь М. С. Дистанционное измерение электрических зарядов воздушных объектов //Вестник Концерна ПВО Алмаз-Антей. 2015. №. 3 (15).
3. Иванов М. И. и др. Решение трехмерных нестационарных задач импульсной электроразведки //Автометрия. 2007. Т. 43. №. 2. С. 33-44.
4. Титлинов В.С., Человечков А. И., Астафьев П. Ф., Вишнев В. С. Индуктивный способ электромагнитного мониторинга процесса оттайки грунта. Патент 2156986. Россия. 2000г.
5. Персова М. Г. и др. Проблемы и возможности электромагнитных площадных геофизических зондирований при использовании телеметрических систем регистрации данных // Автометрия. 2007. №. 2. С. 45-54.
6. Каринский А. Д. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике (Статические поля. Стационарное электрическое поле). Изд. 2-е, исправленное. Учебное пособие. Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ-РГГРУ). 2014. 105 с. Учебное пособие составлено на основе практикумов [6, 7]. //Москва: Рассмот, 2014.
7. Иванов М. И. и др. Решение трехмерных нестационарных задач импульсной электроразведки //Автометрия. 2007. Т. 43. №. 2. С. 33-44.
8. Джурик В. И. и др. Обследование тектонических нарушений по трассе газопровода методом вертикальных электрических зондирований //Успехи современного естествознания. 2016. №. 12-2. С. 380-386.
9. Tang X. et al. Theoretical analysis and finite element method simulations on dynamic sensitivity of hemisphere-shaped electrostatic sensors //Advances in Mechanical Engineering. 2016. Т. 8. №. 8.
10. Гринберг Г. А. Избранные вопросы математической теории электрических магнитных явлений. Москва: Рипол Классик, 2013.

11. Ольшанский В. Эпизодические электрические разряды при социальных взаимоотношениях: пример азиатских клариевых сомов // Журнал общей биологии. 2011. Т. 72. №. 3.
12. Lissmann H. W. Electric location by fishes // Scientific American. 1963. Т. 208. №. 3. С. 50-59.
13. Зацепина Г. Н. и др. Электрическая система регуляции процессов жизнедеятельности // М.: Изд-во Моск. ун-та. 1992.
14. Bowman J. D. et al. Manual for measuring occupational electric and magnetic field exposures. – US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Division of Biomedical and Behavioral Sciences, 1998.
15. Shnyder V. et al. Sensor networks for medical care. Harvard Computer Science Group Technical Report TR-08-05. 2005.
16. Prance R. J. et al. An ultra-low-noise electrical-potential probe for human-body scanning // Measurement Science and Technology. 2000. Т. 11. №. 3. С. 291.
17. Homma S. et al. Location of electric current sources in the human brain estimated by the dipole tracing method of the scalp-skull-brain (SSB) head model // Electroencephalography and clinical Neurophysiology. 1994. Т. 91. №. 5. С. 374-382.
18. Jin R. L. et al. Ultrahigh sensitivity electric field detection with a liquid electro-optical film // Optics letters. 2011. Т. 36. №. 7. С. 1158-1160.
19. Park C. et al. An ultra-wearable, wireless, low power ECG monitoring system // Biomedical Circuits and Systems Conference, 2006. BioCAS 2006. IEEE. IEEE, 2006. С. 241-244.
20. Sullivan T. J., Deiss S. R., Cauwenberghs G. A low-noise, non-contact EEG/ECG sensor // Biomedical Circuits and Systems Conference, 2007. BIOCAS 2007. IEEE. IEEE, 2007. С. 154-157.
21. Yao J., Wan Y. A wavelet method for biometric identification using wearable ECG sensors // Medical Devices and Biosensors, 2008. ISSS-MDBS 2008. 5th International Summer School and Symposium on. IEEE, 2008. С. 297-300.

22. Lopez A., Richardson P. C. Capacitive electrocardiographic and bioelectric electrodes //Biomedical Engineering, IEEE Transactions on. 1969. №. 1. С. 99-99.
23. Beardsmore-Rust S. T. Remote applications of electric potential sensors in electrically unshielded environments. University of Sussex, 2010.
24. Бекмачев А. Датчики Epic от Plessey Semiconductors – прорыв в сенсорных технологиях //Компоненты и технологии. 2013. №. 1. С. 21-24.
25. Chi Y. M., Cauwenberghs G. Wireless non-contact EEG/ECG electrodes for body sensor networks //Body Sensor Networks (BSN), 2010 International Conference on. IEEE, 2010. С. 297-301.
26. Мисеюк О. И. Модуляционный датчик напряженности электрического поля в проводящей среде. 2015.
27. Муякшин С. И. Модель ультразвукового эхолокатора с фазированной антенной решеткой для спецпрактикума по радиофизике //Открытое образование. – 2009. №. 5.
28. Гаврилов А. М., Германенко О. Н. Эхолокатор для распознавания морских грунтов //Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 1995. Т. 1. №. 1.
29. Буймистряк Г. Я. Информационно-измерительная техника и технология на основе волоконно-оптических датчиков и систем //СПб.: ИВА, ГРОЦ Минатома. 2005. С. 101.].
30. Минаев И. Г., Воротников И. Н., Мастепаненко М. А. Способ измерения уровня жидкостей //Достижения науки и техники АПК. – 2010. – №. 9.
31. Stratton J. A. Theory of Electromagnetism [Russian translation] //Gostekhizdat, Moscow--Leningrad. 1948.