

Учреждение Российской академии наук Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал)

*На правах рукописи*

МАКСИМЕНКО ВАЛЕРИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ



**ШУМЫ И ПОМЕХИ ПРИ ПРИЕМЕ  
НИЗКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ  
В МОРСКОЙ ВОДЕ**

Специальность 1.3.4 - радиофизика

диссертация на соискание ученой степени доктора  
физико-математических наук

Фрязино, 2023 г.

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	с. 5
<b>Глава 1. Помехи, шумы и радиосигналы в морской воде</b> .....	с. 27
1.1. Общие положения.....	с. 27
1.2. Случайные электромагнитные поля в морской воде .....	с. 28
1.3. Шумы датчиков электромагнитного поля в морской воде .....	с. 33
1.4. Применение низкочастотных радиоволн.....	с. 44
<b>Глава 2. Шумы в отсутствие движения</b>	
<b>и предельная чувствительность электродных датчиков</b> .....	с. 54
2.1. Электродный шум в отсутствие движения.....	с. 54
2.2. Составляющие импеданса электродных датчиков.....	с. 76
2.3. Влияние нефтепродуктов на импеданс электродов.....	с. 91
2.4. Согласование электродного датчика с приемным устройством с помощью трансформатора.....	с. 93
2.5 Оптимизация входного трансформатора.....	с. 98
2.6. Бестрансформаторное согласование электродного датчика с приемным устройством.....	с. 112
2.7. Предельная чувствительность электродного датчика и приемного устройства с электродным датчиком.....	с. 117
2.8. Краткие выводы.....	с.121
<b>Глава 3. Шумы электродных датчиков при движении</b>	
<b>в морской воде</b> .....	с. 123
3.1. Электродный шум при движении датчика относительно морской воды.....	с. 123
3.2. Связь электродного шума с пульсациями скорости и давления жидкости.....	с. 144
3.3. Пульсации потенциала металлического электрода, совершающего гармонические колебания в электролите .....	с. 161
3.4. Краткие выводы.....	с. 171

<b>Глава 4. Природа шума движения и методы его уменьшения</b> .....	с. 172
4.1. Связь пульсаций потенциала электрода с пульсациями скорости электролита вследствие модуляции толщины диффузионного слоя.....	с. 172
4.2. Изменение потенциала электрода при деформации двойного электрического слоя .....	с. 189
4.3. Уменьшение шума движения электродного датчика.....	с. 201
4.4. Вращающийся электрод в электродном датчике.....	с. 211
4.5. Влияние обтекателей на шум движения электродного датчика .....	с. 239
4.6. Измерение пульсаций скорости жидкости с помощью электродного датчика.....	с. 248
4.7. Краткие выводы .....	с. 252
<b>Глава 5. Особенности конструкции высокочувствительных электродных датчиков и приемных устройств для радиосвязи с подводным объектом</b> .....	с. 253
5.1. Конструирование электродных датчиков, предназначенных для работы на движущихся объектах.....	с. 253
5.2. Повышение чувствительности приемного устройства путем компенсации «шума движения».....	с. 267
5.3. Компенсация индустриальной помехи при приеме низкочастотных радиосигналов на движущемся подводном объекте.....	с. 278
5.4. Краткие выводы.....	с. 284
<b>Глава 6. Шум и предельная чувствительность безэлектродных датчиков электромагнитного поля</b> .....	с. 286
6.1. Оптимизация магнитоиндукционного датчика .....	с. 286
6.2. Оптимизация трансформаторного датчика электромагнитного поля.....	с. 294
6.3. Предельная чувствительность трансформаторного датчика .....	с. 298
6.4. Повышение коэффициента преобразования трансформаторного датчика электрического поля.....	с. 304

6.5. Сравнение электродных и безэлектродных датчиков по достигаемой предельной чувствительности.....	с. 310
6.6. Уменьшение виброшумов и повышение помехозащищенности трансформаторного датчика .....	с. 311
6.7. Краткие выводы .....	с. 314
<b>Заключение</b> .....	с. 315
<b>Выводы и практические рекомендации</b> .....	с. 319
<b>Список литературы</b> .....	с. 321
<b>Приложение А</b> ..... „	с. 334

## Введение

### *Актуальность темы и объект исследования*

Работа посвящена исследованию шумов датчиков электромагнитного поля крайне низких (КНЧ, 3...30 Гц) и сверхнизких (СНЧ, 30...300 Гц) частот в морской воде и физических процессов, обуславливающих эти шумы, а также разработке методов и малогабаритных технических средств, обеспечивающих максимальную чувствительность при приеме такого поля, что соответствует п. 4 и п. 7 Паспорта специальности 1.3.4 Радиофизика.

При решении ряда научных и практических задач необходимо принимать и измерять низкочастотные электромагнитные поля в морской воде. Измерение электромагнитных полей низкой частоты в океане является одним из средств изучения строения земной коры [1-5]. Применяются электрофизические методы разведки полезных ископаемых на дне океана и прибрежном шельфе, основанные на измерении естественного и специально возбуждаемого низкочастотного электромагнитного поля в морской воде. В последнее время нашел применение способ отыскания и определения координат подводных кабелей и трубопроводов, основанный на измерении излучаемого ими электромагнитного поля в диапазоне частот от десятков герц до десятков килогерц [6]. Способность низкочастотного электромагнитного поля проникать в морскую воду на большую глубину используют для осуществления радиосвязи с подводными объектами на частотах ниже 100 Гц [1; 7- 9; 10]. Для приема электромагнитного поля в море применяют датчики, осуществляющие преобразование компоненты  $E$  или  $H$  электромагнитного поля в пропорциональный им электрический сигнал. При обследовании большой акватории эти датчики, как правило, буксируются за движущимся объектом на кабель-тресе, поэтому они подвергаются воздействию потока воды и вибрации. Датчики, применяемые для приема электромагнитного поля в морской воде, можно разделить на два основных типа. Датчики первого типа имеет два контактирующих с водой разнесенных электрода [11; 12], с помощью которых снимается

разность потенциалов, созданная протекающими в морской воде токами проводимости. Такие датчики называют электродными датчиками электрического поля. Датчики второго типа не имеют контактирующих с водой электродов, поэтому могут быть названы безэлектродными. К ним относятся трансформаторные датчики переменного электрического поля, а также магнитоиндукционные датчики [13; 14]. Трансформаторный датчик реагирует на электрическую компоненту электромагнитного поля, а магнитоиндукционный датчик – на магнитную компоненту.

Значительное ослабление электромагнитного поля в морской воде приводит к необходимости приема слабых полей, находящихся на уровне чувствительности приемного устройства, которая в значительной степени определяется чувствительностью датчика. Повышение чувствительности датчика в морской воде до максимально возможного значения представляет трудную научно-техническую задачу. На вход приемного устройства вместе с полезным сигналом поступает мешающий приему собственный шум датчика, а также помехи различного происхождения. В широком смысле слова шумом в радиофизике принято называть флуктуационные токи и напряжения. Собственным шумом устройства называют шум на его выходе, обусловленный шумовыми источниками, находящимися внутри устройства [15]. В связи с дискретной природой электрического заряда собственный шум возникает при тепловом движении заряженных частиц в активном сопротивлении (тепловой шум), при протекании постоянного тока в усилительных приборах (дробовой шум) и в ряде других явлений. Собственные шумы иногда называют внутренними помехами, подразумевая, что существуют и внешние помехи, например атмосферные, промышленные. Собственным шумом (далее – просто шумом) датчика будем называть флуктуационное напряжение на его выходе при отсутствии внешнего электромагнитного поля. Это напряжение может быть пересчитано в электрическую или магнитную компоненту флуктуационного электромагнитного поля в месте расположения датчика, который при этом считается нешумящим. Помехами будем считать все электромагнитные поля естественного и промышленного происхождения, не являющиеся полезным сигналом.

На глубинах менее 100 метров чувствительность СНЧ приемника определяется, как правило, величиной атмосферных помех [1; 7]. Практические задачи требуют увеличения глубины до несколько сотен метров. На таких глубинах атмосферные помехи, как и полезный сигнал, в значительной степени затухают, и на первый план выходит шум датчика, который и определяет чувствительность приемного устройства. Электродные датчики помимо теплового шума, обусловленного их активным сопротивлением, обладают, так называемым, электродным шумом, вызванным протекающими на поверхности электродов электрохимическими реакциями. При движении электродов относительно воды величина электродного шума значительно возрастает, поэтому составляющая электродного шума, связанная с движением, названа в работе шумом движения. У датчиков, электроды которых разнесены на большое расстояние, значительную величину имеет вибрационный шум, возникающий в соединяющей электроды кабеле вследствие электромагнитной индукции при механической вибрации в магнитном поле Земли, которая неизбежно возникает при буксировке датчиков за кораблем. Безэлектродные датчики тоже чувствительны к вибрации. Вибропомеха является серьезным недостатком безэлектродных датчиков, ограничивающим их применение. Причем, если у трансформаторного датчика вибрационный шум является следствием недостаточной магнитной экранировки, то у магнитоиндукционного датчика он принципиально неустраним. Однако такой датчик может быть использован на неподвижных стационарных объектах. В отсутствие вибрации собственным шумом безэлектродного датчика является его тепловой шум. Также следует иметь в виду, что сам подводный объект, с которым осуществляется радиосвязь, является источником индустриальных помех, которые существенно сказываются на чувствительности приемного устройства в целом. Поэтому в работе исследована возможность уменьшения мешающего действия индустриальной помехи.

Увеличение чувствительности датчика может быть достигнуто как уменьшением его собственных шумов, так и увеличением коэффициента преобразования. Коэффициент преобразования в рассматриваемой задаче есть отношение выходного напряжения датчика к величине напряженности электрической или маг-

нитной компонент электромагнитного поля. У электродных датчиков увеличение коэффициента преобразования достигается увеличением расстояния между электродами. В системах связи с подводными объектами наибольшее применение нашли кабельные электродные датчики, имеющие длину активной части до нескольких сотен метров. Для уменьшения влияния индустриальной помехи активную часть кабельного датчика относят от корабля еще на несколько сотен метров. В результате длина такого кабельного датчика достигает 1000 метров и более [7; 10]. Это создает серьезные проблемы при его эксплуатации, или делает его вообще неприменимым, поэтому необходимо искать пути повышения чувствительности при одновременном уменьшении размеров датчика. Также недостатком кабельного датчика является его диаграмма направленности в виде восьмерки, которая при некоторых курсах судна-буксировщика может приводить к потере связи. Попытки создания малогабаритного датчика параванного типа, то есть размещенного в выпускной герметичной капсуле, имеющей положительную плавучесть и гидродинамическое качество, не имели успеха вследствие очень большого уровня шума и вибропомех [10].

Чувствительность датчика при приеме электромагнитного поля будем определять как минимальный уровень напряженности поля сигнала, при котором его мощность на входе приемника в заданное число раз превышает суммарную мощность всех составляющих шума и помех в полосе 1 Гц. Предельной чувствительностью датчика будем называть минимальный уровень напряженности поля сигнала, при котором его мощность на входе приемника равна мощности теплового шума в полосе 1 Гц. При этом имеется в виду, что приняты меры, которые позволяют устранить другие составляющие шума. Для реализации высокой чувствительности датчика необходимо выполнить его согласование с входным каскадом приемного устройства, который также обладает собственным шумом, чтобы отношение сигнал-шум, сформированное датчиком, ухудшалось за счет собственного шума приемного устройства в минимальной степени.

Исследование помех и шумов при приеме и измерении низкочастотного электромагнитного поля в море проводилось как в нашей стране, так и за рубе-



жом, в основном, в США. В нашей стране измерением слабых постоянных и медленно меняющихся электрических полей в море занимались в Институте земного магнетизма и распространения радиоволн РАН [16; 17]. Разработкой датчиков для приема низкочастотных электромагнитных полей в море занимались Е.Ф. Зимин и Э.С. Кочанов [11; 12]. Конструированием магнитоиндукционных датчиков в Физико - механическом институте АН УССР занимались И.М. Гонтар, П.Б. Дуб, Л.Я. Мизюк, В.А. Ничога [18-20]. В США исследования проводились, в основном, в рамках проекта “Sanguin” по осуществлению радиосвязи с подводным аппаратом. Исследовались шумы кабельного датчика и схемные решения приемника для повышения чувствительности [21-26]. Однако автору не известны открытые публикации на эту тему в зарубежных изданиях за последние годы. Опубликованы некоторые работы, посвященные оптимизации и уменьшению шумов безэлектродных датчиков [27; 28]. Тем не менее, многие вопросы, связанные с повышением чувствительности при приеме электромагнитного поля в море к моменту начала данных исследований не были решены. Опубликованные материалы не позволяли достичь увеличения чувствительности датчиков и приемного устройства в целом до предельно возможного значения. Повышение чувствительности очень важно для практических применений. Например, при осуществлении радиосвязи с погруженным в море объектом увеличение глубины и скорости движения последнего приводят к уменьшению отношения сигнал-шум. Увеличить его до требуемого значения можно либо увеличением мощности передатчика, либо уменьшением шума приемника, в первую очередь, шума датчика. На сверхнизких частотах коэффициент полезного действия излучающей антенны очень мал, поэтому мощность передатчика достигает единиц мегаватт. Увеличение мощности СНЧ и КНЧ передатчика связано с очень большими материальными затратами или вообще невозможно, поэтому уменьшение собственного шума датчиков и повышение чувствительности приемного устройства является весьма актуальным как для системы связи, так и для геологоразведки.

Объектом исследований являются собственные шумы датчиков и методы их уменьшения. Предметом исследования - зависимость величины шума от различ-

ных факторов, способы и условия согласования датчика с приемником, а также борьба с помехами и разработка новых типов датчиков и приемных устройств, позволяющих достичь более высокой чувствительности по сравнению с известными. Поскольку диссертация относится к радиофизике, то электрохимические и гидромеханические процессы, происходящие на поверхности электродов электродных датчиков, не являются объектом исследования. Их рассмотрение является необходимым инструментом для исследования флуктуаций напряжения на электродном датчике в рамках известной теории, развитой специалистами в области физической химии и гидромеханики.

### ***Цель исследования***

Целью диссертационной работы является исследование шумов и помех при приеме КНЧ и СНЧ радиоволн в морской среде, причин их возникновения и методов борьбы с ними, создание малогабаритных технических средств приема низкочастотных электромагнитных полей в морской воде, обеспечивающих чувствительность, сравнимую с известными кабельными датчиками.

### ***Задачи, решаемые в работе:***

- экспериментальное исследование шума электродных датчиков в покоящейся и движущейся жидкости и его зависимости от скорости жидкости, концентрации NaCl в электролите, материала и площади электродов;
- исследование природы электродного шума движения, разработка его математической модели и рекомендаций по его минимизации;
- исследование параметров импеданса различных металлов с точки зрения их применимости для изготовления электродов датчиков, обеспечения минимума теплового шума и стабильности импеданса;

- разработка методов и технических средств согласования электродных датчиков с входными каскадами приемного устройства КНЧ и СЧЧ диапазонов для достижения максимальной чувствительности;

- создание новых малогабаритных электродных и безэлектродных высокочувствительных помехозащищенных датчиков, а также оптимизация конструктивных параметров известных датчиков для обеспечения их наивысшей чувствительности;

- разработка новых методов и технических средств для приема КНЧ и СЧЧ электромагнитной волны в морской воде с целью компенсации индустриальной помехи и шума движения электродного датчика.

### ***Методы исследований***

Теоретические исследования базируются на принципах и достижениях следующих научных дисциплин: электродинамика и распространение радиоволн, теория электрических цепей, статистическая радиотехника, физико-химическая гидродинамика, физическая химия. Экспериментальные лабораторные и натурные исследования выполнены с использованием стандартных измерительных приборов и специально разработанных устройств и установок при широком применении аппаратных и программных компьютерных методов обработки результатов измерений.

### ***Научная новизна работы***

Впервые:

1. Выполнено всестороннее экспериментальное исследование всех компонент электродного шума и выявлена зависимость его от разных факторов (скорости жидкости и ее пульсаций, материала и площади электродов, солености воды и времени выдержки в ней электродов).

2. Разработаны две теоретических модели образования электродного шума движения, которые согласуются с результатами экспериментов.
3. Установлено, что шум движения является главным фактором, ограничивающим чувствительность электродных датчиков. Экспериментально показана возможность уменьшения шума движения электродного датчика на порядок по напряжению при применении обтекателей.
4. На основании разработанной модели образования шума движения предложен, математически обоснован и подтвержден экспериментом новый метод уменьшения в несколько раз шума движения электродного датчика за счет выбора размеров и расположения электродов на плоском диэлектрическом обтекателе. Предложен и математически обоснован новый метод уменьшения шума движения электродного датчика до двух порядков за счет применения вращающихся электродов.
5. Экспериментально подтверждена следующая из разработанной математической модели шума движения корреляция электродного шума с пульсациями скорости жидкости, обтекающей электроды датчика, позволившая осуществить частичную компенсацию шума движения и уменьшить его более чем в 2 раза.
6. Предложен метод компенсации индустриальной помехи при приеме электромагнитных волн СНЧ диапазона на буксируемый кабельный электродный датчик, основанный на различии в затухании электромагнитного поля индустриальной помехи и поля принимаемого сигнала.
7. Выполнена оптимизация конструктивных параметров безэлектродных датчиков для достижения максимальной чувствительности и максимального коэффициента преобразования.
8. Предложены новые технические решения для создания малогабаритных средств приема КНЧ и СНЧ радиосигналов, которые защищены патентами и авторскими свидетельствами.

### *Достоверность результатов.*

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы подтверждается их физической непротиворечивостью, согласованностью результатов лабораторных и натурных экспериментов с результатами теоретического анализа и математического моделирования, а также с результатами других авторов, и воспроизводимостью результатов в разных опытах.

### *Научная и практическая значимость работы.*

1. Получены существенно новые фундаментальные знания о природе и свойствах электродного шума, практически важные в случае, когда электроды используются в качестве элементов высокочувствительного датчика. Впервые разработана теория электродного шума движения, которая подтверждена экспериментом. Важным практическим результатом работы является доказательство возможности создания малогабаритных высокочувствительных устройств для приема электромагнитных волн сверхнизкой и крайне низкой частоты в морской среде, а также разработка таких устройств с электродными и безэлектродными датчиками, способных заменить приемные устройства с кабельными датчиками, длина которых достигает более чем 1000 м.
2. Использование полученных в диссертационной работе результатов позволяет максимально повысить чувствительность малогабаритных датчиков и устройств для приема низкочастотного электромагнитного поля в море. На практике это означает возможность осуществлять прием сигнала при глубинах и скоростях движения, ранее недостижимых без увеличения мощности передатчика. Такой подход позволяет экономить существенные

средства на проведении исследовательских, опытно-конструкторских работ и в процессе эксплуатации низкочастотных радиолиний.

*На защиту выносятся следующие положения*

1. На частотах ниже нескольких десятков герц в отсутствие движения относительно воды электродный датчик имеет избыточный электрохимический шум, не исчезающий и при выдержке его в морской воде в течение нескольких суток, в том числе импульсный шум. Функция распределения электродного шума при этом имеет трехгорбую форму с отрицательным эксцессом. После выдержки до исчезновения импульсов избыточный шум имеет спектр типа  $f^{-\alpha}$ , где величина  $\alpha$  составляет от 1 до 1,5 в зависимости от материала электродов, а функция распределения шума близка к гауссовской. У датчика с электродами из лучших по шумовым свойствам некорродирующих металлов (тантал, титан, нержавеющая сталь), отношение избыточного шума к тепловому на частотах ниже 10 Гц достигает нескольких раз.
2. При движении электродного датчика в морской воде возникает специфический электродный шум движения, превышение которого над тепловым шумом по напряжению достигает нескольких десятков раз. Именно он ограничивает чувствительность малогабаритных буксируемых электродных датчиков. У некорродирующих электродов шум движения обусловлен флуктуациями скорости жидкости, в частности, турбулентностью. Спектральные зависимости шумового напряжения имеют вид  $f^{-\alpha}$ , где  $\alpha \approx 1,6 \dots 1,2$  при скорости движения жидкости 2...3,5 м/с. Наименьший шум движения имеют датчики с электродами из тантала, титана, нержавеющей стали.

3. Созданы две теоретические модели шума движения, которые качественно и количественно согласуются с результатами экспериментальных исследований. Установлено, что основными причинами возникновения шума движения являются электрохимические процессы на поверхности электрода, а именно: изменение скорости адсорбции кислорода поверхностью электрода при модуляции толщины диффузионного слоя на границе электрод-жидкость набегающим пульсирующим потоком жидкости, и деформация двойного электрического слоя на границе металл-электролит. Корреляционная связь шума движения с пульсациями скорости жидкости относительно электродов позволяет осуществить его компенсацию и повысить чувствительность приемного устройства в несколько раз.
4. Выбор размеров и места расположения электродов, встроенных в поверхность диэлектрического обтекателя, равно как и применение обтекателей, защищающих электроды от потока жидкости, позволяет до десяти раз уменьшить шум движения электродного датчика по напряжению. Применение вращающихся электродов позволяет уменьшить шум движения датчика до двух порядков.
5. Различие в затухании электромагнитного поля промышленной помехи, распространяющегося от буксирующего кабельный электродный датчик объекта, и принимаемой электромагнитной волны, распространяющейся от поверхности моря, позволяет осуществить компенсацию промышленной помехи и повысить чувствительность приемного устройства при уменьшении длины датчика.
6. Разработаны методики оптимизации известных безэлектродных датчиков, а также предложены новые конструкции электродных и безэлектродных датчиков, которые в условиях буксировки и вибрации имеют более высокую чувствительность, чем известные.

### *Апробация работы и публикации.*

Основные результаты диссертации изложены в 43 опубликованных работах. Среди них 24 статьи (23 опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, и проиндексированы в РИНЦ, а 18 из них проиндексированы в WoS), 17 авторских свидетельств и патентов на изобретение и полезную модель, опубликованы тезисы двух докладов на конференциях. Также опубликованы три статьи [71; 72; 118], тезисы доклада на конференции [119] и получен патент на изобретение [79] по смежным с темой диссертации вопросам.

### *Личный вклад автора.*

Результаты диссертационной работы автором получены лично или при его непосредственном определяющем участии. А именно, автор:

- спланировал, подготовил и провел эксперименты по исследованию электродного шума и измерению составляющих электродного импеданса в лабораторных условиях;
- подготовил натурный морской эксперимент, принимал участие в его осуществлении и в обработке результатов эксперимента;
- создал теоретические модели возникновения шума движения электродных датчиков и получил соотношения, определяющие изменение потенциала электрода при скачке скорости жидкости;
- обосновал возможность уменьшения шума движения электродного датчика путем выбора размеров и расположения электродов на плоском диэлектрическом обтекателе, а также доказал это в лабораторном эксперименте;
- обосновал возможность уменьшения шума движения электродного датчика путем применения вращающихся электродов и предложил конструкции электродных датчиков с их использованием;



- оптимизировал по максимальному отношению сигнал-шум магнитоиндукционный датчик и трансформаторный датчик по максимальному коэффициенту преобразования;

- разработал методику и условия согласования электродных датчиков с приемным устройством с целью достижения максимального отношения сигнал-шум, включая оптимизацию входного трансформатора на минимум шума;

- предложил ряд существенных отличительных признаков помехозащищенных датчиков, а также устройств для измерения скорости жидкости, обтекающей датчики, признанных изобретениями;

- обосновал возможность компенсации индустриальной помехи и шума движения и предложил схемы приемного устройства с компенсацией индустриальной помехи и шума движения, признанные изобретениями.

Автор выражает благодарность соавторам: к.т.н. Акиндинову В.В. принадлежит постановка задачи исследования электродного шума, к.т.н. Нарышкин В.И. участвовал в проведении натурных экспериментов в морских условиях, к.т.н. Лишин И.В. принимал участие в обсуждении результатов экспериментальных исследований. Особую признательность автор выражает д.т.н., проф. Яковлеву О.И., оказавшему автору большую помощь при оформлении диссертации. Автор благодарит соавторов изобретений Акиндинова В.В., Лишина И.В., Кулакова А.Ф., Литвинова А.Л., Максименко О.Г., Мачину Я.В. за помощь в разработке отдельных конструктивных элементов заявленных устройств, Миронова С.В. и Лепехина В.В. за помощь в обработке результатов лабораторного эксперимента. Сотрудники ИРЭ РАН, указанные в библиографическом описании статей [72; 118], принимавшие участие в экспериментах по обнаружению подводного кабеля с помощью электродных и магнитоиндукционных датчиков, изготовленных в соответствии с разработанными в диссертации рекомендациями, а также Гатилов А.В., принимавший участие в измерении низкочастотных электромагнитных полей в водоемах Подмосковья [119], не являются соавторами данной диссертационной работы.

### *Структура и объем работы.*

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и выводов, содержит 333 страницы текста, включая 115 рисунков, 21 таблицу и список литературы из 119 библиографических наименований. После названия каждой главы даны ссылки на опубликованные работы автора, по которым написана данная глава. Ссылки на известные работы других авторов, как правило, дополнены фамилией первого автора, взятой в круглые скобки.

Глава 1 содержит обзор литературы по теме диссертации. В ней рассмотрены источники помех и шумов при приеме радиосигналов сверхнизкой частоты в морской воде. На глубине до 50-100 метров основной причиной, мешающей приему сигнала, являются атмосферные помехи, образующиеся в результате грозовой активности атмосферы. При распространении вглубь океана сигнал испытывает такое же ослабление, как и атмосферные помехи, поэтому отношение сигнал/помеха сохраняется, пока собственный шум датчика электромагнитного поля не становится сравним по величине с атмосферными помехами. Дальнейшее увеличение глубины требует значительного увеличения мощности передатчика, которая и так очень велика. Увеличение предельной глубины на 20 м на частоте 100 Гц потребует увеличения мощности передатчика в 5 раз, что может оказаться технически неосуществимо. На глубине более 100 метров атмосферные помехи можно не учитывать. На первый план выходит собственный шум датчика электромагнитного поля и индустриальная помеха буксирующего датчик объекта. В связи с большим ослаблением принимаемого сигнала при распространении в морской воде применяются кабельные электродные датчики, длина которых достигает более чем 1000 метров. Поскольку активная часть датчика отнесена от источника помехи на расстояние порядка 300 метров, это дает возможность ослабить и индустриальную помеху. Однако такой длинный дат-

чик создает большие проблемы при его эксплуатации. Малогабаритные электродные датчики не обеспечивают необходимой чувствительности из-за малой величины полезного сигнала при большом собственном шуме в движении. Этот шум связан с электрохимическими процессами, протекающими на поверхности электродов даже из химически стойких к коррозии металлов. У таких металлов это процесс формирования двойного электрического слоя на поверхности электродов, процесс роста окисной пленки, связанный с адсорбцией кислорода. У химически нестойких металлов это процесс электрохимической коррозии. У безэлектродных датчиков (магнитоиндукционного, трансформаторного) при буксировке возникает сильная вибрационная помеха, которая делает их практически непригодными для применения на движущемся объекте. Указанные недостатки известных датчиков приводят к необходимости исследования причин возникновения шумов и помех и разработке методов борьбы с ними.

Главы 2, 3, 4, 5 и 6 содержат оригинальные материалы, полученные диссертантом. Глава 2 написана на основе работ [62-69]. В ней представлены результаты экспериментального исследования электродного шума в отсутствие движения электродов и составляющих импеданса электродов из разных материалов в морской воде, исследованы способы и условия согласования электродного датчика с приемным устройством, выполнена оптимизация на минимум коэффициента шума входного трансформатора, определена предельная чувствительность приемного устройства с электродным датчиком. В разделе 2.1 приведены результаты лабораторных исследований шума электродов из различных материалов в отсутствие движения. Показано, что кроме теплового шума, даже в отсутствие движения все электроды имеют электрохимический избыточный шум, который у корродирующих металлов (латунь, бронза) на частотах ниже 30 Гц в десятки раз по напряжению превышает тепловой. При этом у некорродирующих танталовых электродов на частотах в единицы герц напряжение избыточного шума больше теплового в 2...3 раза. Для танталовых электродов на частотах выше 30 Гц с до-

статочной для практики точно можно считать электродный шум равным тепловому. Установлено, что электродный шум при отсутствии движения датчика имеет спектр типа  $1/f^\alpha$  ( $\alpha \approx 1...1,5$ ). Функция распределения электродного шума при небольшой длительности выдержки электродов в соленой воде (менее 3-5 суток) за счет большого количества шумовых импульсов, природа возникновения которых не установлена, значительно отличается от гауссовской и имеет отрицательный коэффициент эксцесса. По мере увеличения времени выдержки закон распределения электродного шума приближается к нормальному. Выяснилось, что как избыточный, так и тепловой шум с ростом площади электродов  $S$  уменьшаются практически пропорционально  $\sqrt{S}$ , а их отношение изменяется мало. В разделе 2.2 изложены результаты экспериментального исследования зависимости составляющих электродного импеданса (активного сопротивления и емкости между электродами, находящимися в морской воде) от времени выдержки в электролите и частоты. Описана методика измерений. Активное сопротивление определяет величину теплового шума электродного датчика и его предельную чувствительность. Емкость оказывает влияние на частотную характеристику входной цепи приемного устройства. Обе эти составляющие определяют условия оптимального согласования датчика с приемным устройством, поэтому важна их стабильность во времени. По результатам исследования сделан вывод о том, что с точки зрения стабильности составляющих импеданса, а также достижения минимума тепловых шумов наиболее пригодными для изготовления электродов являются тантал, ниобий, никель, титан, золото, нержавеющая сталь, хром. В разделе 2.3 экспериментально исследовано влияние загрязнения поверхности электродов нефтепродуктами на параметры импеданса. Установлено, что попадание нефтепродуктов на сухую поверхность электродов увеличивает их сопротивление в 5 раз и уменьшает емкость в 3 раза, что приводит к увеличению теплового шума и рассогласованию электродного датчика с приемным устройством. В разделе 2.4 определены условия оптимального согласования электродного датчика с приемным устройством с помощью трансформатора, получены расчетные соотноше-

ния, определяющие предельную чувствительность приемного устройства с электродным датчиком. В разделе 2.5 выполнена оптимизация на минимум коэффициента шума конструктивных параметров входного трансформатора на броневом и кольцевом сердечнике, осуществляющего согласование электродного датчика с малошумящим усилителем приемного устройства. Определено число витков и диаметр провода в обмотках входного трансформатора, при которых достигается минимальный коэффициент шума. В разделе 2.6 рассмотрено бестрансформаторное согласование электродного датчика с приемным устройством при использовании в предварительном усилителе параллельно включенных транзисторов. Показано, что практически единственно приемлемым способом согласования является трансформаторное согласование. В разделе 2.7 определена предельная чувствительность приемного устройства с электродным датчиком для разных материалов электродов, разных способов согласования и разных шумовых параметрах согласующего трансформатора и предварительного усилителя. Рекомендовано нерезонансное трансформаторное согласование электродного датчика с приемным устройством, поскольку оно менее чувствительно к изменению импедансных характеристик датчика, чем резонансное.

В главе 3, написанной на основании публикаций [73-84], представлены результаты лабораторных исследований шумов электродных датчиков при движении в морской воде. В разделе 3.1 представлены результаты лабораторных исследований напряжения шума для электродов из разных материалов. Описана аппаратура и методика эксперимента. Жидкость приводилась в движение вращающимся активатором с радиальными ребрами, поэтому поток, набегающий на электроды, был турбулизован. Установлено, что при движении уровень шума резко возрастает даже у некорродирующих электродов из тантала и титана. Измеренный шум у корродирующих электродов на несколько порядков, а у некорродирующих до 10 раз превышает тепловой. Напряжение электродного шума имеет спектр типа  $f^{-\alpha}$ , где  $\alpha \approx 1,6...1,2$  при скорости движения жидкости 2...3,5 м/с. У некорродирующих электродов выявлена связь шумового напряжения с флуктуациями

скорости потока жидкости, в частности, с турбулентностью, которая увеличивается с ростом скорости потока. Установлено, что напряжение шума как в отсутствие движения, так и при движении жидкости обратно пропорционально квадратному корню из площади электродов, при этом оно увеличивается с уменьшением концентрации электролита. Наименьшее значение уровня шума по сравнению с другими в одинаковых условиях эксперимента показали электроды из тантала, титана и нержавеющей стали. В разделе 3.2 приведены результаты лабораторного эксперимента на специально созданной установке, в которой жидкость приводится в движение центробежным насосом и по диэлектрическому трубопроводу, в который встроен датчик скорости потока, подается к измерительному электроду. Подробно исследована зависимость электродного шума от времени выдержки в электролите, концентрации электролита, материала и площади электродов и скорости потока жидкости. Установлена связь между пульсациями скорости жидкости и пульсациями разности потенциалов между электродами. Приведены результаты лабораторного эксперимента, который показал отсутствие влияния пульсаций давления в жидкости на величину электродного шума. Подтверждены зависимости шумового напряжения от концентрации электролита, материала электродов и времени выдержки их в электролите, зависимость фоновое электродного шума от площади электродов, полученные в разделе 3.1. В разделе 3.3 представлены результаты экспериментальных исследований напряжения поляризации электрода, совершающего гармонические колебания в электролите. Описана аппаратура и методика эксперимента. Измерены зависимости напряжения поляризации от частоты и амплитуды колебаний, концентрации электролита. Результаты эксперимента подтвердили связь пульсаций электродного потенциала с пульсациями скорости жидкости, установленную в экспериментах, описанных в разделах 3.1 и 3.2, и показали, что при движении жидкости относительно электродов шум электродного датчика значительно возрастает.

В главе 4, написанной на основе работ [82-84, 87-93], дано теоретическое обоснование связи пульсаций электродного напряжения с пульсациями скорости жидкости и исследовано применение обтекателей для уменьшения шума движе-

ния. В разделе 4.1 выполнено теоретическое исследование пульсаций электродного потенциала, вызванное модуляцией толщины диффузионного слоя на границе электрод-электролит при пульсациях скорости жидкости. Получена формула, определяющая скачок потенциала электрода при скачке скорости потока жидкости. В разделе 4.2 теоретически исследовано влияние деформации двойного электрического слоя на границе электрод-электролит набегающим потоком электролита. Получена формула, связывающая скачок электродного потенциала и скачок скорости жидкости. Показано, что развитая в разделах 4.1 и 4.2 теория возникновения пульсаций электродного потенциала находится в хорошем соответствии с результатами экспериментального исследования, описанными в главе 3. В разделе 4.3 теоретически и экспериментально показана возможность уменьшения в несколько раз шума движения электродного датчика за счет выбора размера и расположения электродов на плоском диэлектрическом обтекателе. В лабораторном эксперименте также получено подтверждение правильности теории, развитой в разделах 4.1 и 4.2. В разделе 4.4 показана возможность уменьшения шума движения до десятков раз при использовании вращающихся электродов. В разделе 4.5 исследовано влияние обтекателей, снижающих скорость жидкости у поверхности электродов, на величину шума движения. В частности, приведены результаты лабораторного эксперимента, в котором измерительный электрод совершал гармонические колебания в электролите. Показано, что обтекатель правильной конструкции может в несколько раз уменьшить пульсации напряжения электрода. Также в разделе 4.5 приведены результаты натурального эксперимента на море. Диэлектрические обтекатели с отверстиями защищали электроды датчика от непосредственного воздействия набегающего потока жидкости, при буксировке его за кораблем. Выяснилось, что при установке обтекателей с небольшим числом электроконтактных отверстий, датчик имеет спектральную плотность напряжения шума на частотах выше 16 Гц в среднем на 15 - 20 дБ меньше, чем без обтекателя. Приведены спектры выходного напряжения электродного датчика и установленного рядом с электродами вибродатчика (датчика механической вибрации). Обнаружены совпадающие по частоте пики на спектральных характеристиках элект-

тродного датчика электромагнитного поля и вибродатчика, свидетельствующие об их общем происхождении. Натурный эксперимент показал, что шум движения является главным фактором, ограничивающим чувствительность электродного датчика, чем подтвердил выводы главы 3.

В разделе 4.6 приведена конструкция электродного датчика для измерения пульсаций скорости в турбулентном потоке жидкости, действие которого основано на установленной в главе 3 и разделах 4.1 и 4.2 связи пульсаций электродного потенциала с пульсацией скорости жидкости, в которой находится электрод.

Глава 5 написана на основе работ [97-107] и посвящена конструированию электродных датчиков и приемных устройств с электродным датчиком, предназначенных для использования на движущихся объектах. В разделе 5.1 представлены предложенные диссертантом (в соавторстве) конструкции датчиков, электроды которых защищены от воздействия потока жидкости. Эти датчики имеют пониженный уровень шума движения. В том числе представлены и конструкции электродов кабельного датчика, защищенных как от воздействия потока, так и от механических повреждений. В разделе 5.2 описано предложенное диссертантом приемное устройство с компенсацией электродного шума движения путем вычитания из выходного напряжения электродного датчика компоненты, пропорциональной пульсациям скорости жидкости у электродов датчика. Эта компонента формируется из выходного напряжения датчиков скорости жидкости, установленных непосредственно на электродах датчика. В лабораторном эксперименте доказано, что таким образом можно повысить чувствительность приемного устройства более чем в два раза. В разделе 5.3 описано предложенное диссертантом приемное устройство с кабельным электродным датчиком, в котором осуществляется компенсация индустриальной помехи от электроустановок подводного объекта, буксирующего кабельный датчик. Компенсирующее напряжение, получаемое от пары электродов, установленных на том же кабеле ближе к буксирующему объекту, после уравнивания амплитуд и фазирования вычитают из выходного напряжения кабельного датчика. При этом потери полезного сигнала не превышают 10%. В основе принципа работы приемного устройства лежит тот



факт, что принимаемая электромагнитная волна доходит до всех точек кабельного датчика в одинаковой фазе и с одинаковой амплитудой, а индустриальная помеха, распространяясь от объекта вдоль кабеля, испытывает сильное затухание. Поэтому на коротком компенсационном электродном датчике, расположенном близко к источнику помехи, возникает напряжение помехи, сравнимое с тем, что возникает на длинном основном кабельном датчике. Это позволяет осуществить вычитание индустриальной помехи без заметного ослабления принимаемого сигнала.

Глава 6 написана на основе работ [109-116]. В ней рассмотрены методы повышения чувствительности безэлектродных датчиков электромагнитного поля – индукционных и трансформаторных. В разделе 6.1 выполнена оптимизация формы катушки магнитоиндукционного датчика по максимуму отношения сигнал-шум. Определена предельная чувствительность оптимизированного и неоптимизированного магнитоиндукционного датчика. Показано, что оптимизированный магнитоиндукционный датчик имеет на 10...15% большую предельную чувствительность, чем неоптимизированный. В разделе 6.2 произведена оптимизация конструктивных параметров трансформаторного датчика по максимуму коэффициента преобразования. В результате оптимизации коэффициент преобразования может быть повышен в несколько раз. Если датчик буксируется за кораблем, то для уменьшения помех, создаваемых его силовыми установками, датчик находится на большом расстоянии от приемника и соединен с ним кабелем. При этом повышение коэффициента преобразования датчика позволяет повысить чувствительность приемного устройства за счет уменьшения влияния вибрационного шума кабеля и индустриальной помехи. В разделе 6.3 получено выражение для предельной чувствительности трансформаторного датчика. Показано, что на частотах выше некоторой  $f_{гр}$  при надлежащем выборе размеров и материала сердечника можно пренебречь вкладом сопротивления катушки в тепловой шум датчика. Она определяется только его геометрическими размерами, в частности, диаметром окна катушки. В разделе 6.4 представлена конструкция трансформаторного датчика переменного электрического поля в море, имеющего повышенный до 3 раз коэф-

фициент преобразования. В разделе 6.5 проведено сравнение электродных и безэлектродных датчиков по достигаемой предельной чувствительности. Сделан вывод, что в диапазоне 3...300 Гц наивысшую предельную чувствительность обеспечивает электродный датчик. В разделе 6.6 приведены предложенные диссертантом (в соавторстве) конструкции трансформаторных датчиков с уменьшенной чувствительностью к вибрации и помехам промышленного происхождения.

В заключении сформулированы основные результаты исследований, изложенных в диссертации. В разделе выводы и практические рекомендации обобщены результаты выполненной работы и даны рекомендации по их практическому применению. В диссертации использовались единицы системы СИ.

## Глава 1. Помехи, шумы, и радиосигналы в морской воде

### 1.1. Общие положения

Электромагнитные волны сверхнизких и крайне низких частот находят применение при передаче радиосигналов на объекты, находящиеся под водой. Преобразование компоненты  $E$  или  $H$  электромагнитного поля в пропорциональный ей электрический сигнал осуществляет датчик электромагнитного поля. При приеме радиосигналов с выхода датчика на вход приемного устройства поступает аддитивная смесь сигнала и шума. Шум при этом можно представить совокупностью собственного шума датчика и шума, обусловленного случайными электромагнитными полями, существующими в окружающей среде. Собственный шум датчика складывается из нескольких компонент, характерных для конкретного типа датчика. Электродный датчик имеет тепловой шум, определяющийся величиной активного сопротивления датчика, и электродный шум, возникающий вследствие протекания электрохимических реакций на поверхности электродов датчика. Кроме того, при движении электродного датчика в воде возникает специфический шум движения, который может на порядки превышать электродный шум в состоянии покоя, и вибрационный шум, представляющий собой случайное напряжение, индуцируемое в соединяющем электроды проводе при вибрации в магнитном поле Земли. Безэлектродные датчики, такие, как трансформаторный и магнитоиндукционный, имеют тепловой шум и вибрационный шум, возникающий в катушке датчика при вибрации в магнитном поле Земли. Механическая вибрация неизбежно возникает при установке датчика на движущемся объекте или при буксировке за кораблем.

Случайные электромагнитные поля в море, являющиеся помехами при приеме полезного сигнала, имеют различную физическую природу. Источники этих полей могут находиться как в самой воде, так и вне ее. Основные из них: атмосферные помехи, представляющие собой случайные электромагнитные поля

дальних и ближних гроз, проникающие из атмосферы в воду; гидродинамические электромагнитные поля, возникающие при движении водных масс в магнитном поле Земли; промышленные помехи, в основном, представляющие собой электромагнитные поля мощных электроустановок корабля, на котором находится приемник.

### *1.2. Случайные электромагнитные поля в морской воде*

Рассмотрим подробнее основные виды случайных электромагнитных полей в воде.

а) Атмосферные помехи [1; 7; 29; 30].

Основным источником атмосферных помех в диапазоне от десятков герц до десятков килогерц являются грозные разряды. Благодаря малому затуханию в этом диапазоне частот атмосферные помехи представляют собой сумму электромагнитных полей, порождаемых как местными грозами, так и удаленными от места приема на тысячи километров. Поверхность Земли и ее ионосфера образуют сферический резонатор, имеющий резонансные частоты около 8, 14, 20, 26 и 32 Гц. Добротность резонатора определяется потерями в ионосфере и составляет несколько единиц. В связи с его низкой добротностью, молниевые разряды возбуждают в резонаторе всплески быстро затухающих колебаний. Накладываясь друг на друга, эти колебания создают, помеховый фон, называемый шумановским по имени первого исследователя резонатора Земля – ионосфера. Импульсные сверхнизкочастотные колебания получили название атмосфериков. Шумановский фон определяется, в основном, грозовой активностью в экваториальной области Земли. Он имеет нормальный закон распределения, его дисперсия в течение десятков минут может оставаться постоянной. Спектральный анализ фона позволяет заметить всплески на частотах шумановских резонансов. На этот фон накладываются импульсы от ближних гроз, амплитуда которых на порядок и более превосходит среднеквадратическое значение фона. В результате атмосферные помехи приобретают негауссов характер, Кривая плотности вероятности амплитуды имеет бо-

лее острую форму с вытянутыми «хвостами» по сравнению с кривой нормального случайного процесса. Распространяясь вглубь океана, атмосферные помехи испытывают значительное ослабление. В морской воде параметры плоской электромагнитной волны связаны соотношениями

$$\begin{aligned} E &= E_0 \exp(j\omega t - kh) \\ H &= H_0 \exp(j\omega t - kh) \\ E &= \eta H, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота,  $f$  - частота,  $t$  - время,  $h$  - глубина,  $\eta$  - собственный импеданс среды,  $E_0$  и  $H_0$  - соответственно напряженность горизонтальной компоненты электрического и магнитного поля волны на поверхности моря,  $k$  - волновое число, определяемое параметрами среды. Для морской воды на низких частотах

$$\eta = \sqrt{j\omega\mu_0 / \sigma} \approx 2 \cdot 10^{-3} (1 + j) \sqrt{f / \sigma}, \quad (1.2)$$

$$k = (1 + j) \sqrt{\omega\mu_0\sigma / 2} = \alpha + j\beta, \quad (1.3)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  - магнитная проницаемость вакуума,  $\sigma$  - проводимость воды (среднее значение проводимости  $\sigma = 4 \text{ Сим/м}$ ),  $\alpha \approx 2 \cdot 10^{-3} \sqrt{f\sigma} \text{ нп/м} = 1,73 \cdot 10^{-2} \sqrt{f\sigma} \text{ дБ/м}$  - коэффициент затухания,  $\beta$  - фазовый множитель, определяющий длину волны в воде  $\lambda = 2\pi / \beta = \sqrt{10^7 / f\sigma}$ , м.

На рисунках 1.1 и 1.2 изображены графики зависимостей горизонтальных составляющих электрического и магнитного поля атмосферных помех от частоты на глубинах до 150 метров [1]. Эти зависимости рассчитаны, исходя из экспериментальных данных по атмосферным помехам в воздухе, учитывая затухание поля в воде. Измерения атмосферных помех в море подтверждают правильность расчетов [31]. На рисунке 1.1 показаны спектральные зависимости мощности горизонтальной составляющей электрического поля атмосферных помех на разной глубине относительно  $1\text{В}^2/\text{м}^2\text{Гц}$ . На рисунке 1.2 - спектр горизонтальной составляющей магнитного поля атмосферных помех относительно  $1\text{А}^2/\text{м}^2\text{Гц}$ . Цифры возле кривых – глубина в метрах. Как следует из рисунка 1.1, на глубине более

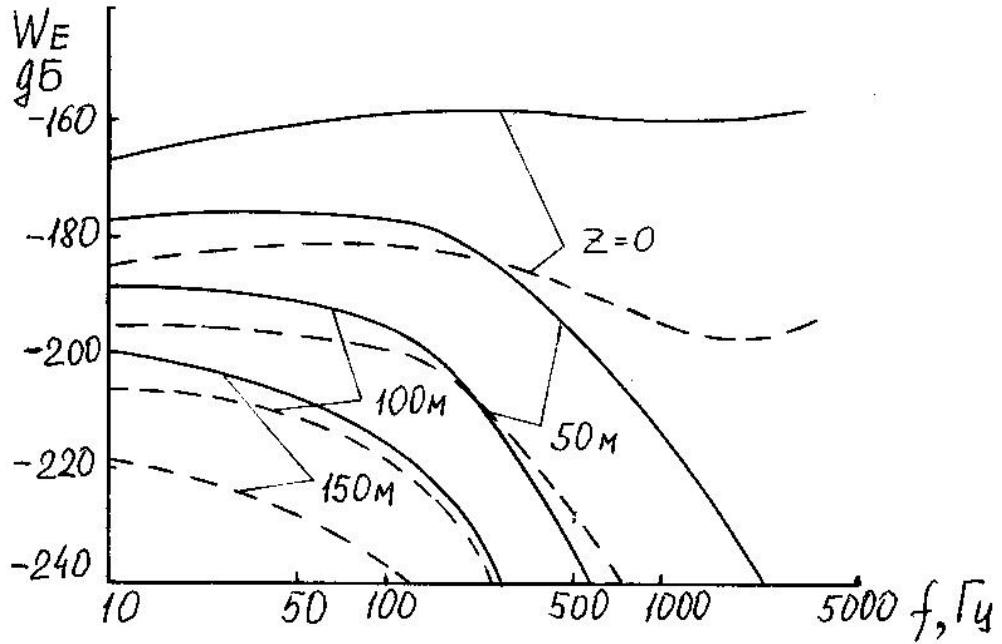


Рисунок 1.1 - Спектральная плотность мощности горизонтальной составляющей электрического поля атмосферных помех в океане на разной глубине в дБ относительно  $1\text{В}^2/\text{м}^2\text{Гц}$ .  
Сплошная линия – максимальное значение, пунктир – минимальное значение [1]

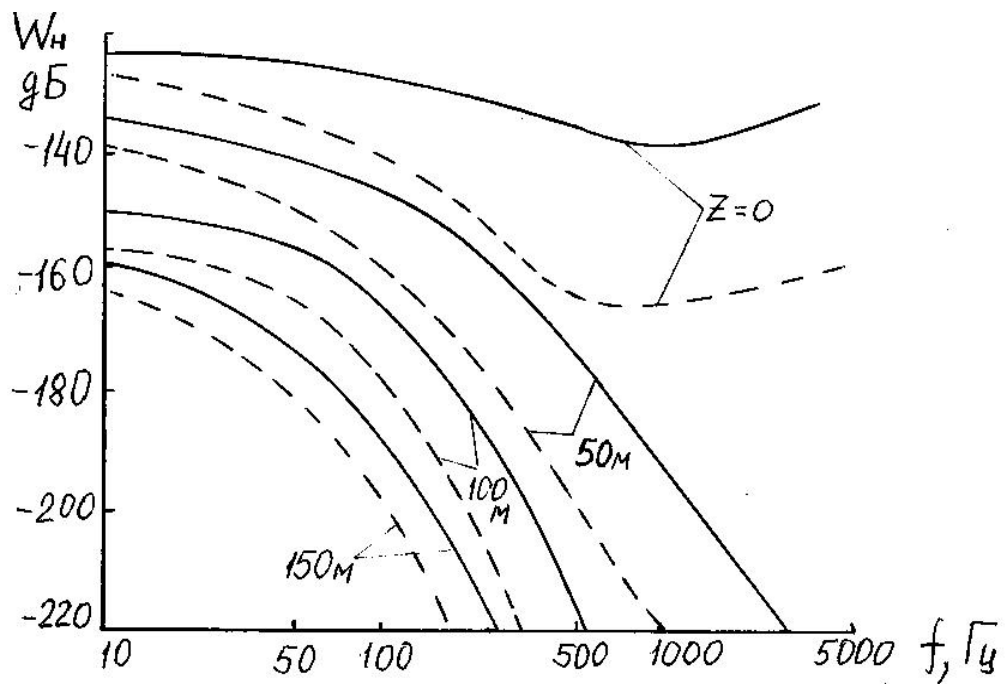


Рисунок 1.2 - Спектральная плотность мощности горизонтальной составляющей магнитного поля атмосферных помех в океане на разной глубине в дБ относительно  $1\text{А}^2/\text{м}^2\text{Гц}$ .  
Сплошная линия – максимальное значение, пунктир – минимальное значение [1]

150 метров напряженность электрического поля атмосферных помех на частотах 10...100 Гц составляет  $10^{-10} \dots 10^{-11} \text{ В/м}\sqrt{\text{Гц}}$ . Морская вода является дисперсионной средой, постоянная распространения которой зависит от частоты. Это приводит к «расплыванию» импульсных атмосферных помех во времени и уменьшению их амплитуды.

б) Гидродинамические случайные электромагнитные поля [1; 32].

Происхождение этих полей связано с движением морской воды в магнитном поле Земли. При этом, как и в любом движущемся проводнике, в морской воде индуцируется электрическое поле  $\vec{E} = [\vec{V}] \cdot [\vec{B}]$ , величина которого зависит от скорости и направления движения. Причиной возникновения гидродинамических полей являются приливные и ветровые волны, конвективные и другие течения. Конвективные течения и океаническая турбулентность являются основными источниками электромагнитных полей вблизи дна. Основная часть энергии этих полей сосредоточена в диапазоне частот не более 1 Гц [1]. Лабораторные эксперименты показали, что спектр гидродинамических электрических полей, вызванных турбулентностью, постоянен до некоторой частоты  $f_0$ , затем спадает по закону  $f^{-1}$ . С увеличением средней скорости потока жидкости абсолютное значение напряженности электрического поля возрастает, а частота  $f_0$  сдвигается в сторону более высоких значений. В эксперименте при скорости течения воды 0,3...2 м/с частота  $f_0$  составляла 1...3 Гц [32]. В море на частотах выше 1 Гц величиной гидродинамических помех, как правило, можно пренебречь по сравнению с атмосферными помехами. Уже на частоте 0,01 Гц спектральная плотность случайного электрического поля гидродинамических помех составляет около  $10^{-9} \text{ В/м}\sqrt{\text{Гц}}$  и убывает обратно пропорционально частоте [1]. Сведения о величине такого рода помех на частотах выше десятых долей герца отсутствуют. Однако, экстраполируя спектр электрической составляющей поля гидродинамических помех в область более высоких частот, можно показать, что на частоте 10 Гц их уровень не превышает  $10^{-12} \text{ В/м}\sqrt{\text{Гц}}$ . Значит, их величина сравнивается с величиной атмосфер-

ных помех лишь на глубине более 300 метров. Постоянные и медленно меняющиеся электрические поля, вызванные конвективными и другими течениями, в отдельных местах океана могут достигать значений более  $10 \text{ мкВ/м}$  [1]. Случайные изменения ориентации приемной антенны при буксировке в таком поле могут быть причиной шума, однако в практических случаях приема сверхнизкочастотного электромагнитного поля в море на фоне других видов помех такая компонента шума не отмечена.

При пересечении приемной антенной, движущейся со скоростью  $v$ , естественных турбулентных образований в океане в соответствии с гипотезой Тейлора о «замороженной» турбулентности пространственные флуктуации, в частности флуктуации магнитного поля, преобразуются во временные флуктуации. Турбулентность, порождаемая движением в морской воде крупного объекта, которым может быть морское животное, корабль, контейнер с аппаратурой, также возбуждает переменные электрические и магнитные поля. Турбулентный след, оставляемый движущимся объектом, существует в течение некоторого времени. Флуктуации магнитного поля в нем на несколько порядков выше, чем флуктуации, порождаемые естественной турбулентностью. Следовательно, пересечение датчиком турбулентного следа может быть причиной кратковременного повышения уровня помех.

в) Индустриальные помехи [1; 3; 7; 21; 22].

Индустриальные случайные электромагнитные поля порождаются как наземными источниками, так и буксирующими измерительную аппаратуру плавающими объектами. Основными наземными источниками являются электрические сети и линии электропередачи, которые, благодаря большой протяженности, могут рассматриваться как антенны, излучающие на промышленной частоте (50 Гц, 60 Гц) и ее гармониках. В прибрежной зоне уровень этих помех может превышать атмосферный фон, однако выбором рабочей частоты и полосы пропускания приемника их влияние может быть ослаблено в необходимой степени. Индустриальные помехи от корабля зависят от его энерговооруженности и изменяются в широких пределах. К индустриальным можно отнести также другие специфиче-



ские помехи, связанные с кораблем. Металлический корпус корабля совместно с находящимися в воде элементами конструкциями из других металлов образует гальваническую пару. Протекающий между ними ток имеет флуктуации, связанные как с движением корабля в целом, так и его отдельных частей, как, например, вращение гребного винта. Уменьшение уровня корабельных помех возможно путем удаления приемной антенны от корпуса корабля на возможно большее расстояние. В частности, с помощью плавучего кабеля приемную антенну относят от корабля на несколько сотен метров [3; 7; 21; 22].

### *1.3. Собственные шумы датчиков электромагнитного поля в морской воде*

Датчик осуществляет преобразование компоненты  $E$  или  $H$  электромагнитного поля в пропорциональный ей электрический сигнал. Датчики, применяемые для приема электромагнитного поля в морской воде, можно разделить на два основных типа: электродные и безэлектродные.

#### а) Электродные датчики.

Электродный датчик имеет два контактирующих с водой разнесенных электрода, воспринимающих разность потенциалов, созданную протекающими в морской воде токами проводимости [11; 12; 17; 33]. Электродные датчики нашли наибольшее применение, так как просты по конструкции и в меньшей степени, чем безэлектродные, подвержены влиянию вибрации, которая неизбежна при установке на движущемся объекте. Рассмотрим основные составляющие шума электродных датчиков.

Как любой источник электрического сигнала, электродный датчик обладает внутренним сопротивлением (импедансом), имеющим в общем случае комплексный характер. Его активная составляющая, включающая в себя сопротивление растекания между электродами  $r$ , а также сопротивление контакта электродов с электролитом, является источником теплового шума датчика. Электродвижущая сила теплового шума определяется формулой Найквиста  $e = \sqrt{4kTR\Delta f}$ , где  $k$  - по-

стоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура,  $R$  – активная составляющая импеданса датчика,  $\Delta f$  - полоса частот, в которой измеряется шум. Сопротивление растекания  $r$  представляет собой то сопротивление, которое оказывает окружающая датчик морская вода протекающим в ней от одного электрода к другому токам проводимости. В силу отсутствия частотной зависимости проводимости морской воды оно не зависит от частоты и полностью определяется геометрией датчика. В частности, по [34] если электроды выполнены в форме шаров с радиусами  $a_1$  и  $a_2$  и расположены в бесконечной среде с проводимостью  $\sigma$  на расстоянии  $d$  друг от друга, то сопротивление растекания равно

$$r = \frac{1}{2\pi\sigma} \left( \frac{1}{2a_1} + \frac{1}{2a_2} - \frac{1}{d} \right). \quad (1.4)$$

Если электроды помещены в диэлектрические оболочки (обтекатели) с отверстиями, то сопротивление растекания  $r$  возрастает на величину, зависящую от количества и размеров отверстий, а также от геометрии оболочки. Формулой (1.4) можно воспользоваться и в случае некруглых электродов. В этом случае вводится понятие эффективного радиуса

$$a_{эфф} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (1.5)$$

где  $S$  – площадь поверхности электрода. При помещении электрода в электролит на его поверхности образуется двойной электрический слой [35; 36]. У обычно используемых для электродов металлов, имеющих на своей поверхности плотную диэлектрическую пленку окисла, ( $Ta_2O_5$ ,  $Nb_2O_5$ ,  $TiO_2$ ), а также у благородных металлов, образование двойного электрического слоя связано с адсорбцией и диссоциацией молекул воды с образованием хемосорбированных ионов кислорода, создающих отрицательный заряд поверхности [35-38]. Вторая (жидкостная) обкладка двойного электрического слоя формируется за счет положительно заряженных ионов водорода и металлов, раствор солей которых и представляет собой электролит (например, ион  $Na^+$  при растворении  $NaCl$ ), называемых противоионами. Сопротивление и емкость контакта электрода с электролитом в значи-

тельной степени определяются параметрами двойного электрического слоя, который может рассматриваться как конденсатор с потерями. Однако многие применяемые для изготовления электродов некорродирующие металлы, как, например, титан, тантал, никель, ниобий, нержавеющая сталь распространенных марок, имеют на своей поверхности плотную диэлектрическую пленку, которая и обуславливает их стойкость к воздействию агрессивной среды. Эта диэлектрическая пленка также образует конденсатор с потерями, обкладками которого являются металл электрода и окружающий электролит. В этом случае двойной электрический слой формируется на поверхности окисной пленки. В общем случае, как сопротивления потерь, так и емкости обоих конденсаторов зависят от частоты. Так как электрохимические процессы инерционны, с ростом частоты потери в двойном слое уменьшаются, контактное сопротивление уменьшается. Активное сопротивление датчика  $R$  является суммой сопротивления растекания  $r$  и контактного сопротивления электродов, включающего в себя сопротивление двойного электрического слоя, имеющегося на границе соприкосновения электродов с окружающей его жидкостью, и сопротивление потерь в окисной пленке, если таковая имеется на поверхности металла. Сопротивление контакта электродов с окружающей средой зависит от площади и материала электродов. Как следует из (1.1), при  $d \gg a_1, a_2$  сопротивление растекания обратно пропорционально радиусу электродов, а контактное сопротивление – квадрату радиуса. Поэтому у электродов большой площади сопротивление растекания составляет основную часть сопротивления датчика.

Датчик электромагнитного поля подключен к обладающему собственным шумом предварительному усилителю приемного устройства, шумовые свойства которого отображают в виде двух шумовых источников: включенного параллельно входу усилителя источника шумового тока и включенного последовательно со входом источника шумового напряжения. Минимальное влияние собственного шума усилителя на отношение сигнал-шум, сформированное датчиком, достигается при вполне определенном сопротивлении датчика, которое называют опти-

мальным сопротивлением [39; 40]. Если сопротивление датчика отличается от оптимального, то для достижения максимального отношения сигнал-шум необходимо осуществить согласование датчика с предварительным усилителем. Как правило, это делается с помощью трансформатора и коэффициент трансформации зависит от составляющих импеданса датчика [12]. Таким образом, для уменьшения шума датчика, подключенного к предварительному усилителю, требуется обеспечить не только низкое значение его активного сопротивления, но и стабильность всех составляющих импеданса.

Второй компонентой шума электродного датчика является специфический электродный шум, который вызывается изменением активности электрохимических процессов на поверхности электродов при их движении в морской воде [7; 23]. В общем случае при погружении в электролит металлического электрода последний приобретает относительно электролита некоторый равновесный потенциал, величина которого зависит от материала электрода [35; 36]. Постоянная разность потенциалов между двумя такими электродами связана с различиями их химического состава и протеканием тока между ними через входное сопротивление приемно-регистрирующего устройства. Происходящие на поверхности электродов при протекании тока электрохимические процессы приводят к увеличению разности потенциалов по сравнению с равновесной. Это явление называется поляризацией электродов. Разность потенциалов испытывает инфранизкочастотные флуктуации, называемые дрейфом. Уменьшение дрейфа достигается применением специальных неполяризующихся неметаллических электродов, например, хлор-серебряных, состоящих из хлористого серебра. Уровень шума последних в диапазоне частот  $0,1 \dots 1$  Гц может быть ниже единиц микровольт при использовании высокоомного измерителя и специальных методов защиты и тренировки электродов [17; 41]. Большой опыт по измерению слабых постоянных и медленно меняющихся электрических полей в море накоплен в Институте земного магнетизма и распространения радиоволн РАН. Методы борьбы с шумом датчиков в данном случае направлены, в основном, на уменьшение постоянной разности потенциалов между электродами и ее дрейфа. Для уменьшения влияния

дрейфа и расширения частотного диапазона измерителя электрического поля в сторону низких частот до долей герца применяют различного рода механические модуляторы поля [42; 43]. Применение датчиков с неполяризуемыми электродами на частотах выше единиц герц не оправдано, поскольку они имеют высокое активное сопротивление, соответственно и большой тепловой шум [12]. Меньшую величину теплового шума можно получить, применяя электроды из металлов. У химически стойких, некорродирующих электродов существует электрохимический шум, который обусловлен следующими причинами. Одна из них – это формирование двойного электрического слоя на поверхности электродов, которое связано с специфической адсорбцией ионов кислорода. Поскольку процесс адсорбции протекает медленно, время установления параметров двойного электрического слоя может составлять часы [35]. Связанный с этим электрохимический шум платиновых микроэлектродов исчезал лишь через трое суток выдержки их в электролите [44; 45]. Вторая причина существования электрохимического шума у некорродирующих электродов (например, у электродов из тантала, ниобия, титана) – это электрохимические реакции, сопровождающие рост окисной пленки на их поверхности. С образованием плотной окисной пленки металл электрода переходит в пассивное состояние, при котором скорость электрохимических процессов резко замедляется. Потенциал поверхности электрода относительно электролита при этом обычно сдвигается в положительную сторону. Наличие в электролите ионов хлора способствует разрушению пассивирующей окисной пленки и смещению потенциала электрода в отрицательную сторону. При определенных концентрациях пассиватора (ионов кислорода) и активатора (ионов хлора) в растворе наблюдаются колебания потенциала электрода как следствие конвективного движения электролита с неравномерным распределением активатора и пассиватора [35]. С увеличением толщины окисной пленки электрохимические процессы замедляются, однако наличие пор в окисной пленке не позволяет им прекратиться совсем. Неоднородность пористой поверхности приводит к тому, что потенциал поверхности электрода относительно электролита изменяется от точки к точке в пределах нескольких милливольт и не остается постоянным во времени [35].

Электродный шум является источником погрешности в различных измерительных приборах, например, электромагнитных расходомерах при измерении расхода жидкости, в молекулярно-электронных преобразователях сейсмографов, различных электрокинетических датчиках и преобразователях неэлектрических величин [32; 46-48]. Датчик с электродами из корродирующего в морской воде металла имеет специфический коррозионный шум, причина возникновения которого состоит в следующем. Вследствие неоднородности металла на поверхности электрода образуются локальные гальванические элементы, анодные участки которых в процессе электрохимической коррозии разрушаются, поэтому физико-химические свойства поверхности электрода постоянно меняются, флуктуирует и разность потенциалов между электродами [34; 49-51]. Коррозионный шум имеет амплитудный спектр типа  $f^{-\alpha}$ , где  $\alpha = 1..2$  [49; 50]. Большие значения  $\alpha$  получаются при наличии дополнительной частотной фильтрации сопротивлением и емкостью контакта электрода с электролитом, в частности, двойным электрическим слоем. Для обозначения шума электрохимического происхождения автор применяет термин «избыточный шум», подчеркивая, что он является причиной превышения измеренного электродного шума над тепловым.

Электродный датчик с большим расстоянием между электродами, имеет еще одну компоненту шума, а именно: вибрационный шум, индуцируемый при вибрации соединяющего электроды провода в магнитном поле Земли. Известен кабельный датчик электромагнитного поля, используемый на подводных лодках. В этом случае один контактный электрод расположен на конце кабеля, а другой в его средней части [3; 7; 8; 10; 22-24]. При достаточно большой длине активной части датчика (то есть расстоянии между электродами) вибрационный шум значительно превышает электродный шум. Такая конструкция датчика позволяет увеличить отношение сигнал-шум за счет большого расстояния между электродами. Величина электродного шума не зависит от расстояния между электродами, напряжение вибрационного шума пропорционально квадратному корню из длины активной части, а напряжение сигнала пропорционально ее длине. Поэтому уве-

личение расстояния между электродами в два раза ведет к удвоению отношения сигнал-помеха по мощности. Также увеличение длины кабеля позволяет уменьшить индустриальные помехи от буксирующего датчик корабля.

На рисунке 1.3 показан спектр шума кабельного датчика с длиной активной части 300 м при скорости движения 3...6,5 м/с в дБ относительно  $1B/m\sqrt{Гц}$  [7].

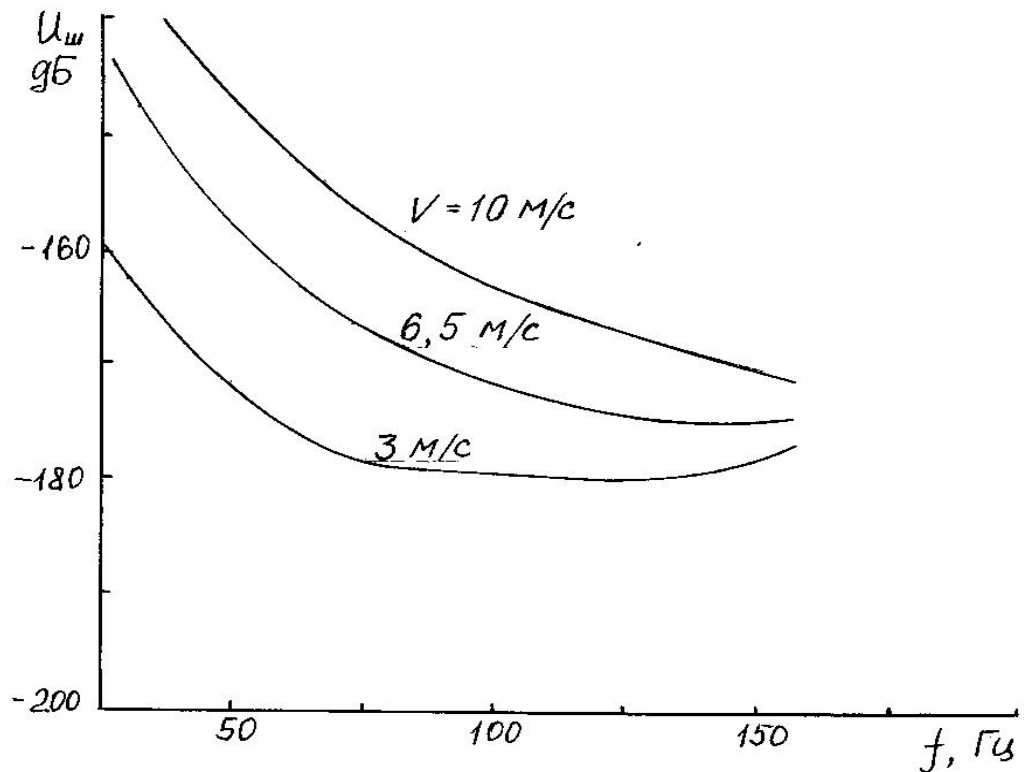


Рисунок 1.3 - Спектр шумов кабельного электродного датчика при разных скоростях движения, дБ относительно  $1B/m\sqrt{Гц}$  [7]

В диапазоне частот 50...150 Гц при скоростях движения 3...6,5 м/с собственный шум кабельного датчика имеет величину порядка  $10^{-9}...10^{-8} B/m\sqrt{Гц}$  (рисунок 1.3). При этом нижняя граница шума определяется шумом приемного устройства и шумами датчика, не связанными с вибрацией. При уменьшении длины кабельного датчика величина вибрационного шума уменьшается, поэтому у датчиков с длиной порядка единиц метров и менее вибрационной составляющей шума датчика можно пренебречь. На первый план выходят другие его составляющие, связанные с движением электродов. По данным [10] при скорости менее 3...4 узлов на глубине более 100 м на частотах более 50...70 Гц чувствительность при приеме

СНЧ электромагнитного поля определяется электродным шумом кабельного датчика и шумом входных цепей приемника.

Некоторые сведения о шумах электродов, движущихся относительно электролита, содержатся в работах [7; 23; 25; 32; 44-46; 51]. Авторы отмечают, что электродный шум увеличивается с ростом скорости движения и связан с турбулентностью потока жидкости. Специфический электродный шум, проявляющийся при движении электродов относительно морской воды и не связанный с наличием внешнего магнитного поля, диссертант назвал «шумом движения». Следует отметить, что в зарубежных публикациях под шумом движения обычно понимают вибрационную составляющую шума [7; 8; 24]. Шум электродов электромагнитных расходомеров воды исследован в [31; 45]. Авторами установлено, что электродный шум увеличивается при уменьшении электропроводности воды. При небольшой скорости течения воды (ламинарный режим) электродный шум имеет минимальное значение. При высокой скорости (число Рейнольдса больше 2000) наблюдалось резкое увеличение электродного шума, связанное с турбулентным характером течения. Увеличение площади электродов приводило к уменьшению величины шума. По мнению авторов, это связано с усреднением по площади турбулентных вихрей, а также с увеличением размеров электродов увеличивается толщина ламинарного подслоя у поверхности электрода, что уменьшает влияние турбулентных вихрей [52]. Измеренные спектральные характеристики электродного шума имели падающий с ростом частоты характер. Спектральная плотность шума в диапазоне частот 3...30 Гц составила  $20...10 \text{ мкВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  при скорости течения  $2 \text{ м/с}$ . Зависимость величины электродного шума от электропроводности электролита дает основания предполагать, что он связан с наличием на поверхности электрода двойного электрического слоя, толщина которого увеличивается с уменьшением концентрации, следовательно, и электропроводности электролита. Известны электрокинетические эффекты, вызванные вовлечением в движение жидкостной обкладки двойного электрического слоя [48; 54]. В жидкостной обкладке выделяют плотную и диффузную части. Плотная часть представляет собой



слой противоионов, сильно связанных электростатическими силами с заряженной поверхностью. Диффузионной называют ту часть двойного электрического слоя, где энергия взаимодействия противоионов с поверхностью сравнима с тепловой энергией или меньше ее в результате экранирования поверхностного заряда плотной частью жидкостной обкладки. При обтекании электрода потоком электролита часть жидкостной обкладки увлекается потоком по условной поверхности скольжения, отстоящей на некоторое расстояние от поверхности электрода, образуя поверхностный ток. Вследствие того, что плоскость скольжения расположена внутри двойного электрического слоя, т.е. в области, где потенциал отличается от потенциала в толще электролита на некоторую величину  $\zeta$ , это обуславливает возникновение ряда электрокинетических эффектов. В частности, эффект, получивший название «потенциал протекания», возникающий при просачивании электролита сквозь пористый материал, может являться одной из причин увеличения шума при движении датчика. Он заключается в том, что при протекании электролита через капилляр между его торцами образуется разность потенциалов, обусловленная падением напряжения на сопротивлении электролита в капилляре при замыкании поверхностного тока, существующего на его стенках. Внутри капилляра, имеющего отношение длины к диаметру порядка 10 и более, характер течения жидкости всегда ламинарный. За счет упорядоченного вовлечения в движение диффузной части двойного электрического слоя между торцами капилляра устанавливается разность потенциалов

$$U_n = \frac{\Delta P \varepsilon_a \zeta}{4\pi\eta\sigma}, \quad (1.6)$$

где  $\Delta P$  - разность давлений между торцами капилляра,  $\varepsilon_a$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость жидкости,  $\zeta$  - электрокинетический потенциал диэлектрика, в котором выполнен капилляр,  $\eta$  - динамическая вязкость жидкости,  $\sigma$  - электрическая проводимость жидкости [54]. Более точная формула, определяющая потенциал протекания для пористой системы, учитывает размеры капилляров и частоту пульсаций разности давлений  $\Delta P$ . В частности, потенциал протекания

при частоте пульсации давления большей, чем  $f_n = \nu / 2\pi a^2$ , где  $a$  - радиус капилляра,  $\nu$  - кинематическая вязкость жидкости, уменьшается пропорционально  $\sqrt{f}$  [48]. Для водных электролитов при  $a = 0,1$  мм предельная частота  $f_n = 15$  Гц. Электрокинетический потенциал  $\zeta$  зависит от структуры двойного электрического слоя, которая, в свою очередь, определяется концентрацией противоионов в электролите и свойствами поверхности электрода. Измеренный электрокинетический потенциал для растворов NaCl составляет у разных диэлектриков единицы - десятки милливольт [15; 16]. При увеличении концентрации электролита  $\zeta$  - потенциал стремится к нулю [55]. В некоторых случаях шум электродного датчика авторы связывают с электрокинетическими явлениями на обтекателе, защищающем датчик от механических повреждений, особенно, если он выполнен из пористого диэлектрика [15; 16]. Наличие пор в окисной пленке на поверхности электрода тоже может являться причиной шумов движения. Движение жидкости может ускорять процессы коррозии и роста окисной пленки, тем самым увеличивать электродный шум. Кроме того, при существовании в море неоднородности концентрации растворенных солей в соответствии с известным соотношением Нернста между электродами возникает разность потенциалов

$$\Delta\varphi = \frac{kT}{e} \ln \frac{c_1}{c_2}, \quad (1.7)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура,  $e$  - заряд электрона,  $c_1, c_2$  - концентрация электролита возле первого и второго электрода соответственно [36]. При движении датчика пространственные флуктуации концентрации преобразуются во временные флуктуации разности потенциалов между электродами. Изменения потенциала электродов могут быть вызваны столкновением со взвешенными частицами и микроорганизмами.

б) Безэлектродные датчики электромагнитного поля.

Такие датчики не имеют контактирующих с водой электродов. К безэлектродным относится трансформаторный датчик, представляющий собой герметизированный и магнитоэкранированный трансформатор с кольцевым сердечником

[12-14]. Магнитное поле протекающего сквозь окно сердечника переменного тока проводимости возбуждает в обмотке датчика переменное напряжение, пропорциональное напряженности электрического поля. Собственный шум такого датчика – это тепловой шум обмотки и объемного витка, которым служит окружающая его морская вода, а также вибрационный шум, возникающий при вибрации в магнитном поле Земли при его буксировке вследствие недостаточной магнитной экранировки. Поскольку вибрационный шум может превышать тепловой, актуальной задачей при конструировании трансформаторного датчика является оптимизация его конструктивных параметров по наибольшему коэффициенту преобразования, а также уменьшение вибрационного шума. Тепловой шум трансформаторного датчика определяется активным сопротивлением объемного витка, образованного окружающей датчик морской водой, и активным сопротивлением провода катушки датчика. Для расширения частотного диапазона в сторону низких частот трансформаторный датчик может быть снабжен механическим модулятором электрического поля или иметь модуляцию характеристик магнитопровода [57; 58].

Также к безэлектродным датчикам относится магнитоиндукционный датчик, представляющий собой катушку со стержневым магнитным сердечником [14; 17-19; 59]. Такой датчик не может быть использован на движущемся объекте вследствие принципиально неустранимой чувствительности к вибрации в магнитном поле Земли [28; 60]. Если датчик неподвижен и вибрационный шум отсутствует, то в диапазоне частот до 100 Гц потерями в магнитном сердечнике можно пренебречь. Источниками шума в таком случае являются сопротивление провода катушки постоянному току и вносимое в катушку сопротивление потерь, учитывающее влияние окружающей датчик проводящей среды, которой является морская вода [59; 61]. На более высоких частотах следует учитывать возрастание активного сопротивления катушки за счет потерь в магнитном сердечнике и «эффекта близости» [61]. Применительно к задаче приема низкочастотного электромагнитного поля в море на стационарных объектах актуальной является задача оптимизации конструктивных параметров магнитоиндукционного датчика с це-

лью достижения максимального отношения напряжения сигнала к тепловому шуму катушки.

Для разработки датчиков, предназначенных для приема и измерения низкочастотных электромагнитных полей в море, много сделали Э.С. Кочанов и Е.Ф. Зимин [11; 12]. Их усилия, в основном, были направлены на разработку датчиков трансформаторного типа с металлическими концентраторами тока проводимости. Такого рода датчики фактически представляет собой вариант электродного датчика с согласующим трансформатором.

Исследования в области конструирования и согласования магнитоиндукционных датчиков проводились в физико - механическом институте АН УССР [18-20] и за рубежом [27]. В частности, рассматривалась оптимизация конструктивных параметров датчиков с целью повышения их чувствительности. Однако опубликованные работы относятся либо к более высокочастотному, чем у нас, диапазону, либо оптимизация является неполной, поскольку определяет лишь один конструктивный параметр - толщину цилиндрической катушки датчика при заданной ее массе [18].

#### ***1.4. Применение низкочастотных радиоволн***

Необходимость приема и измерения электромагнитных полей крайне низких и сверхнизких частот возникает при решении ряда научных и практических задач. Например, измерение специально возбуждаемого низкочастотного электромагнитного поля или естественного электромагнитного поля Земли в море помогает определить строение земной коры и используется при поиске полезных ископаемых на дне океана и прибрежном шельфе [2-5]. Нашел применение способ отыскания и определения координат подводных кабелей и трубопроводов по излучаемому ими электромагнитному полю [6]. Низкочастотные электромагнитные волны применяют для передачи сообщений на глубоко погруженные в море объекты [4; 5; 7; 26]. Созданная на Кольском полуострове мощная передающая станция «Зевс» первоначально была предназначена для обеспечения радиосвязи с глу-

боко погруженными подводными объектами на частоте 82 Гц, однако впоследствии она нашла двойное применение. С ее помощью также проводились эксперименты по изучению глубинного строения земной коры, как в районе расположения передатчика, так и на значительном расстоянии от него в Западной Сибири и Забайкалье [4; 5]. Также для электромагнитного зондирования земной коры были созданы КНЧ-СНЧ генераторы «Энергия-2» и «Энергия-3» с мощностью 200 кВт, использующие антенное устройство передатчика «Зевс». Большое внимание было уделено разработке высокочувствительных средств для регистрации и измерения СНЧ-КНЧ электромагнитных полей на основе магнитоиндукционных преобразователей [5].

Сначала кратко рассмотрим особенности распространения сверхнизкочастотных электромагнитных волн в атмосфере и морской воде. В рассматриваемом диапазоне частот (3...300 Гц) поверхность Земли и ее ионосфера могут рассматриваться как проводящие поверхности, образующие волновод. В таком волноводе может распространяться на большие расстояния с небольшим затуханием волна квазиТЕМ типа, имеющая вертикальную составляющую поля  $E$  и горизонтальную составляющую поля  $H$  [7; 29; 30]. При распространении этой волны над океаном как результат утечки энергии через нижнюю стенку волновода возникает плоская волна, распространяющаяся практически вертикально вниз. Небольшая величина затухания в таком волноводе, составляющая на частотах 10...100 Гц величину около 0,3...1 дБ на 1000 км [7] позволяет осуществить глобальную связь. Недостатком такой связи является низкая скорость передачи информации вследствие узкой полосы частот, занимаемой радиосигналом. Излучающая антенна при этом представляет собой короткий по сравнению с длиной волны заземленный на концах горизонтальный провод, с питанием в средней точке. Для осуществления глобальной связи достаточно излучаемой мощности менее 10 Вт, при этом подводимая к антенне мощность в связи с ее малым коэффициентом полезного действия составляет от сотен киловатт до единиц мегаватт [7; 8]. В точку приема приходят две волны: одна – по короткой дуге земного шара, другая – по длинной. Сигнал, приходящий по длинной дуге земного шара, вследствие небольшого коэффициен-

та затухания на крайне низких частотах может быть сравним по величине с сигналом, приходящим по короткой дуге. Пусть передающая антенна представляет собой горизонтальный провод длиной  $L$  с током  $i = I_m \cos \omega t$ . В дальней зоне напряженность горизонтального магнитного поля сигнала, приходящего в точку приема по кратчайшей дуге земного шара длиной  $r$  определяется выражением

$$H_1 = m \omega I_m L E \sqrt{\frac{1/R_3}{\sin(r/R_3)}} \cos \varphi \cdot \exp[-\alpha r + j\omega(t - r/v_\phi) + j\frac{\pi}{4}]. \quad (1.8)$$

Здесь  $m = \frac{1}{4\pi\eta_0} \sqrt{\frac{\pi\mu_0}{c}}$ ,  $\eta_0 = 377$  Ом – импеданс свободного пространства;

$c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме;  $E$  – «коэффициент возбуждения»,  
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума;  $\omega$  – круговая частота;  $R_3 = 6370$  км – радиус Земли;  $\varphi$  – угол между направлением распространения волны и осью передающей антенны;  $\alpha$  – коэффициент затухания;  $t$  – время. Коэффициент

возбуждения  $E = \left( h \sqrt{\frac{\sigma_3 c}{v_\phi}} \right)^{-1}$  учитывает влияние проводимости грунта  $\sigma_3$  в месте

расположения передающей антенны, высоты ионосферы  $h$  и отношения скорости света  $c$  к фазовой скорости волны  $v_\phi$  на связь антенны с волноводом Земля – ионосфера. Соответствующее ему вертикальное электрическое поле определяется простым соотношением

$$E_1 = \eta_0 \frac{c}{v_\phi} H_1. \quad (1.9)$$

Для кругосветного сигнала, приходящего в точку приема по длинной дуге, напряженность горизонтального магнитного поля согласно [7] равна

$$H_2 = H_1 \exp[-\alpha 2(\pi R_3 - r) + j2(\pi R_3 - r) \frac{\omega}{v_\phi} - j\frac{\pi}{2}]. \quad (1.10)$$

Наличие двух сигналов создает интерференционную картину типа стоячей волны. Чем ближе их амплитуды, то есть чем ближе приемник к точке антипода, тем сильнее выражены максимумы и минимумы, положение которых зависит от частоты сигнала. Вследствие того, что реальный связной сигнал не монохромати-

чен, а занимает некоторую полосу частот, а также вследствие разного затухания на трассе распространения прямого и кругосветного сигнала, последний мало влияет на напряженность поля реального связного сигнала, если точка приема находится на расстоянии более 4000 км от точки антипода [7].

Из-за возможности проникать в морскую воду на большую глубину электромагнитные волны с частотой ниже 300 Гц используют для передачи сообщений на глубокопогруженный объект [7-10]. Морская вода является проводящей средой, поэтому распространяющаяся в ней волна испытывает сильное затухание. Электрическая проводимость морской воды зависит от концентрации растворенных в ней солей, в основном NaCl. Среднее значение солености воды в мировом океане составляет 35 г/л. При этом проводимость воды составляет около 4 сим/м, толщина скин-слоя  $\Delta = \lambda / 2\pi$ , определяющая расстояние, при прохождении которого электромагнитное поле уменьшается в  $e = 2,72$  раз, на частоте 100 Гц составляет 25 м, а длина волны - около 160 м. Зависимость коэффициента затухания  $\alpha$  от частоты при разных значениях проводимости воды  $\sigma$  (цифры возле графиков) показана на рисунке 1.4.

□

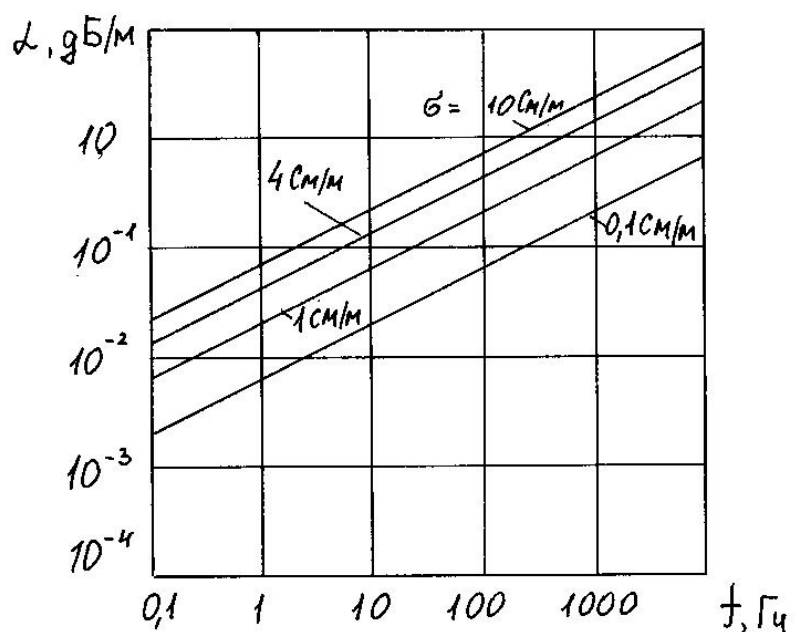


Рисунок 1.4 - Зависимость коэффициента затухания электромагнитной волны в морской воде от частоты при разных значениях проводимости [1]

При распространении вглубь океана сигнал испытывает такое же ослабление, как и атмосферные помехи, поэтому отношение сигнал/помеха сохраняется, что позволяет не увеличивать мощность передатчика для компенсации затухания. Это справедливо до тех пор, пока собственный шум датчика-преобразователя электромагнитного поля не становится сравним по величине с атмосферными помехами. Дальнейшее увеличение глубины требует значительного увеличения мощности передатчика, которая, как показано выше, и так очень велика. Например, увеличение предельной глубины всего на 20 м на частоте 100 Гц потребует увеличения мощности передатчика в 5 раз, что может оказаться технически неосуществимо.

Более перспективным является уменьшение собственного шума датчика, с помощью которого осуществляется прием электромагнитного поля. Выбор частоты для связи с глубоко погруженным объектом осуществляют из компромиссных соображений. Постоянная затухания волны при распространении в волноводе Земля-ионосфера увеличивается с ростом частоты, однако при этом увеличивается коэффициент полезного действия передающей антенны и возрастает излучаемая мощность. Кроме того, следует учитывать частотную зависимость атмосферных помех, поскольку в точке приема важно обеспечить не фиксированный уровень сигнала, а требуемое превышение сигнала над помехой. Для дальности связи от 5 до 15 тысяч километров оптимальное значение частоты находится в пределах 150...50 Гц [7]. За рубежом наибольший интерес к системам связи на сверхнизких частотах отмечен в США. В рамках проекта «Sanguine» проведены эксперименты по осуществлению радиосвязи с погруженной подводной лодкой [7; 8; 21; 26]. На вооружении военно-морского флота США до 2004 года находилась система связи с подводными лодками «Seafarer», имевшая передатчик с мощностью 3 МВт и использующая частоту 76 Гц.

В разделе 1.2 отмечалось, что атмосферные помехи имеют ярко выраженную импульсную составляющую. Амплитуда импульсов может на порядок превосходить уровень фона, при этом импульсы обычно имеют длительность около 1



секунды [30], им принадлежит значительная часть энергии атмосферных помех. Используя амплитудное ограничение импульсных помех, можно улучшить отношение сигнал-помеха на 10...15 дБ [7]. Однако при распространении в такой дисперсионной среде, как морская вода, импульсные атмосферные помехи уменьшаются по амплитуде и растягиваются во времени. В результате амплитудное ограничение импульсов становится неэффективным. Для повышения эффективности работы ограничителя и увеличения отношения сигнал-шум на выходе приемника между предварительным антенным усилителем и амплитудным ограничителем обычно включают фильтр компенсации влияния океана [7], задача которого состоит в восстановлении исходной формы импульсных помех. Амплитудная и фазовая характеристики этого фильтра соответствуют характеристикам слоя морской воды, который проходят помехи, то есть согласно (1.1) и (1.3) имеют вид:

$$K(\omega) = \exp(h\sqrt{\omega\mu_0\sigma/2}), \quad \varphi(\omega) = \exp(jh\sqrt{\omega\mu_0\sigma/2}).$$

Измерение низкочастотных электромагнитных полей осуществляют при геофизических исследованиях, в частности, для электроразведки полезных ископаемых на шельфе [2]. В методе магнитотеллурического зондирования измеряют горизонтальные составляющие естественного электрического и магнитного поля Земли и сравнивают результаты измерений с теоретическими расчетами для плоскостой Земли [1]. В методе частотного электромагнитного зондирования с помощью заземленного на концах горизонтального диполя возбуждают электромагнитную волну, частота которой изменяется в диапазоне от 1 до 1000 Гц. На расстоянии до нескольких километров от излучателя измеряют напряженность электрического поля и определяют среднее значение проводимости донных пород в зависимости от частоты [2]. При этом уменьшение частоты приводит к увеличению глубины зондирования. Также низкочастотные электрические и магнитные поля используют для поиска подводных кабелей и трубопроводов [6]. При этом измеряют магнитное или электрическое поле, порождаемое протекающим по кабелю переменным электрическим током, например, на гармониках промышленной электри-

ческой сети или на более высоких частотах (десятки килогерц), если применяют возбуждение в кабеле переменного тока с помощью внешнего излучателя.

На основании анализа литературных источников можно сделать следующие выводы. На глубинах до 300 метров основным видом случайных электромагнитных полей в диапазоне частот 30...300 Гц являются атмосферные помехи. Гидродинамические помехи могут превышать атмосферные лишь на нижнем краю этого диапазона и на большей глубине. Уровень собственного шума кабельного электродного датчика зависит от скорости его движения и длины. Основными компонентами шума при приеме на кабельный датчик являются: атмосферные помехи; вибрационный шум, электродный шум, связанный с турбулентным движением воды вблизи электродов; промышленные помехи от буксирующего датчик корабля [7; 21]. При длине активной части 300 метров и скорости движения 10 м/с на частоте 100 Гц в пересчете к напряженности электрического поля собственный шум кабельного электродного датчика составляет около  $0,3 \cdot 10^{-10} \text{ В/м}\sqrt{\text{Гц}}$ , то есть -210 дБ относительно  $1 \text{ В/м}\sqrt{\text{Гц}}$  (см. рис.1.1). Следовательно, на глубинах, начиная со 100 метров, его собственный шум имеет один порядок с атмосферными помехами, а глубже 150 метров именно он определяет чувствительность приемного устройства в целом. Большая длина кабельного датчика создает серьезные трудности при ее эксплуатации, ухудшает технические характеристики буксирующего корабля (скорость, маневренность и т.д.), что приводит к необходимости уменьшать ее до минимально возможного значения. При уменьшении длины активной части до нескольких метров вибрационная составляющая шума уменьшается на порядок и становится меньше шума приемного устройства в отсутствие движения, который в соответствии с рис. 1.3 составляет около  $10^{-9} \text{ В/м}\sqrt{\text{Гц}}$ . В пересчете к напряженности электрического поля путем деления напряжения шума на длину активной части это дает значение около  $0,3 \cdot 10^{-9} \text{ В/м}\sqrt{\text{Гц}}$ , то есть -190 дБ относительно  $1 \text{ В/м}\sqrt{\text{Гц}}$  и глубину порядка 50...100 метров, на которой атмосферные помехи имеют примерно ту же величину. Таким образом, при длине

электродного датчика порядка нескольких метров на глубине более 50 метров и скорости движения более 3 м/с собственный шум датчика превышает все другие виды шума и помех, и именно он определяет чувствительность приемного устройства.

К началу данных исследований, то есть к 1983 году, для приема низкочастотных электромагнитных волн под водой применялись, как правило, длинные кабельные электродные датчики, шум которых был достаточно хорошо изучен. В основном он обусловлен вибрацией кабеля в магнитном поле Земли. Недостатком кабельного датчика является его большая длина, ухудшающая технические возможности буксирующего корабля, ограничивает его скорость хода и маневренность. Длинный кабель значительно уменьшает надежность системы связи, так как может оборваться, создать аварийную ситуацию, намотавшись на ходовой винт. Использование плавучего кабеля уменьшает возможность аварии, но ухудшает скрытность при малой скорости хода подводной лодки, поскольку кабель всплывает к поверхности воды. Уменьшение длины кабельного датчика приводит к пропорциональному уменьшению принимаемого сигнала и атмосферных помех. Однако при этом значительно возрастает роль теплового и электродного шума датчика, которые при длине датчика порядка нескольких метров и определяют величину его собственного шума. Для осуществления приема сигнала на малогабаритный датчик на глубине более 100 метров при скорости движения более 3 м/с необходимо либо увеличить мощность передатчика, либо уменьшить собственные шумы датчика. Как показано выше, повышение мощности передатчика практически невозможно. Поэтому единственным реально возможным путем осуществления связи на указанной скорости и глубине является уменьшение шумов датчика до минимальных значений. Для электродного датчика такими шумами являются электродный и тепловой шум. Тепловой шум датчика, определяющийся величиной активной составляющей импеданса датчика, является той физической границей, которая обуславливает его предельную чувствительность. Однако опубликованные данные о составляющих электродного импеданса слишком неполны, чтобы на их основе сделать оптимальный выбор материала электродов и создать

датчик, имеющий наивысшую предельную чувствительность. Электродный шум, в том числе избыточный нетепловой шум электрохимического происхождения и специфический электродный шум, проявляющийся при движении электродов и не связанный с наличием внешнего магнитного поля, был исследован недостаточно. Объем опубликованных к началу исследований данных о природе и величине электродного шума был крайне ограничен и не давал представления о таких важных его характеристиках, как спектральный состав, зависимость уровня шума от материала электродов, конструкции датчика, условий эксплуатации. Таким образом, исследование составляющих импеданса электродов и всех составляющих электродного шума было крайне необходимо для достижения максимально возможной чувствительности электродных датчиков электрического поля в морской воде. Наряду с шумом датчика необходимо было минимизировать влияние на чувствительность собственного шума входных каскадов приемного устройства, что достигается оптимальным согласованием датчика с приемником. При этом важно, чтобы импеданс датчика был стабилен, и условия согласования не изменялись. В соответствии с изложенным проведены всесторонние исследования составляющих электродного импеданса и электродных шумов для различных материалов, результаты которых и составляют значительную часть диссертации. В основе исследования лежит лабораторный и натурный эксперимент. Шум и предельная чувствительность электродных датчиков определяются совокупностью электрофизических, гидромеханических и электрохимических явлений, поэтому теоретическое рассмотрение вопроса наталкивается на очень большие трудности. Это привело к необходимости постановки экспериментов, позволяющих выявить роль каждого механизма в совокупном шуме электродного датчика и в результате предложить пути уменьшения шума и увеличения чувствительности.

Несмотря на то, что безэлектродные датчики на движущихся объектах практически не применяются вследствие их чувствительности к вибрации [1; 7], они могут быть с успехом использованы на стационарных объектах. Однако отсутствие в литературе сведений о чувствительности и шумах таких датчиков, не представляет возможности сравнить датчики между собой и сделать правильный

выбор типа датчика для конкретного применения. Необходимо было провести исследования чувствительности безэлектродных датчиков, определить возможности и пути ее повышения, провести сравнение датчиков разных типов по достигаемой чувствительности. Эти исследования выполнены автором в рамках диссертационной работы. Предложены пути совершенствования и оптимизации конструкции датчиков, а также новые типы датчиков, малочувствительные к вибрации в магнитном поле Земли.

## Глава 2. Шумы в отсутствие движения и предельная чувствительность электродных датчиков [62-69]

### 2.1. Электродный шум в отсутствие движения

Шум электродного датчика в отсутствие движения относительно окружающего электролита обусловлен электрохимическими процессами, протекающими на поверхности электродов, а также наличием активной составляющей импеданса (тепловой шум). С целью определения вклада каждой из этих составляющих в собственный шум датчика на разных частотах, выполнены измерения электродных шумов для некоторых металлов. Для лучшей повторяемости результатов, которую сложно обеспечить в таких измерениях, во всех случаях электроды готовились к эксперименту по единой технологии. Их поверхность полировалась, острые углы закруглялись. Граница электролит-воздух на электроде является источником шума электрохимического происхождения. Чтобы исключить ее влияние на величину измеряемого шума, поверхность электродов в районе границы воздух – электролит и вся нерабочая поверхность покрыта нитрокраской. В качестве электролита использовался раствор морской соли с концентрацией 35 г/л, что соответствует стандартной солености воды в океане. Перед измерениями электроды выдерживались в периодически обновляемом (2-3 раза в сутки) электролите не менее четырех суток в замкнутом состоянии. За 0,5...1 час до начала измерений производилась смена электролита.

К началу исследований автору не удалось обнаружить опубликованных материалов об электродном шуме некорродирующих металлов в морской воде. В соответствии с данными [49] (Hladky) и разделом 1.3 можно было лишь предполагать, что шум у некорродирующего металла меньше, чем у корродирующего. Автором выбраны для сравнения типичные представители этих двух групп. В первом эксперименте исследованы шумы электродов из латуни марки Л63 и тантала. Площадь рабочей поверхности латунных электродов составляла 24 и 185 см<sup>2</sup>, тан-

таловых - 54 и 360 см<sup>2</sup>. Электроды, выполненные в виде полированных пластин с закругленными краями, устанавливались на расстоянии 10...20 мм на крышке ванны из оргстекла объемом около 350 мл, заполненной электролитом, которая помещалась в стальной ящик, выполняющий функцию магнитостатического и электростатического экрана. Электродная ячейка, образованная парой исследуемых электродов, была подключена к измерительному усилителю. Измерялась спектральная плотность шума на частотах 3, 7, 10, 20 и 30 Гц. Сразу после этого с помощью моста переменного тока измерялась активная составляющая импеданса  $R$ , и рассчитывался тепловой шум электродной ячейки по формуле Найквиста.

Особое внимание уделялось достоверности измерений электродного шума. В частности, для определения влияния внешних помех на результаты измерений внутри экрана рядом друг с другом были расположены две идентичные ячейки с электродами из тантала, подключенные к одинаковым высокочувствительным измерительным усилителям, имеющим низкий уровень фликкер-шума. Собственная шумовая ЭДС измерительного усилителя, приведенная к его входу, составляет  $4 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 30 Гц и  $10 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 3 Гц. С выходов измерительных усилителей напряжение шума подавалось на двухканальный самописец. Отсутствие влияния внешних помех и наводок подтверждено тем, что не зарегистрирована корреляция между шумами, двух ячеек при одновременной записи их в полосе 3...20 Гц на ленту самописца. С целью повышения чувствительности усилителя и точности измерений электродная ячейка подключалась к измерительному усилителю через малошумящий повышающий трансформатор с коэффициентом трансформации 100. Это обеспечивало коэффициент шума усилителя в пределах 0,5 - 2 дБ. Измерительный усилитель обеспечивал точность измерения напряжения шума не хуже 5%, точность измерения активной составляющей импеданса  $R$  составляла около 10%.

На рисунках 2.1 - 2.2 представлены спектральные зависимости избыточного и теплового шума электродных ячеек и отношение избыточного шума к теплово-му  $U_{изб}/U_m$ . В соответствии с разделом 1.3 избыточным мы называем электро-

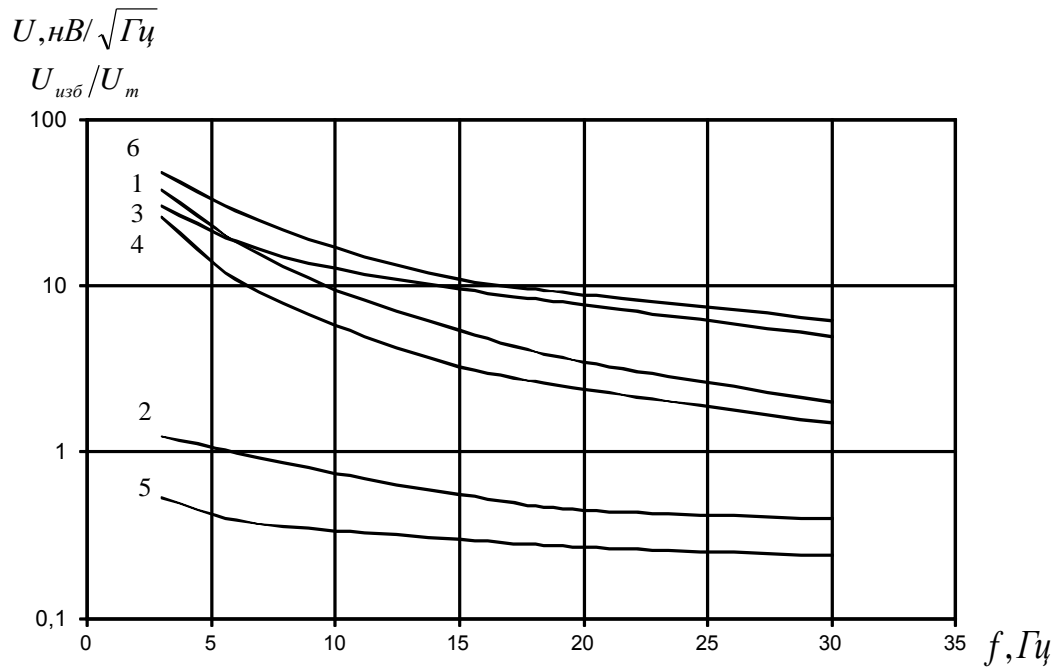


Рисунок 2.1 - Спектральные характеристики шумового напряжения электродов из латуни Л63 в неподвижном электролите. Кривые 1,4 – избыточный шум; 2,5 – тепловой шум; 3,6 – отношение избыточный/тепловой; 1,2,3 – электроды площадью  $24 \text{ см}^2$ ; 4,5,6 –  $185 \text{ см}^2$

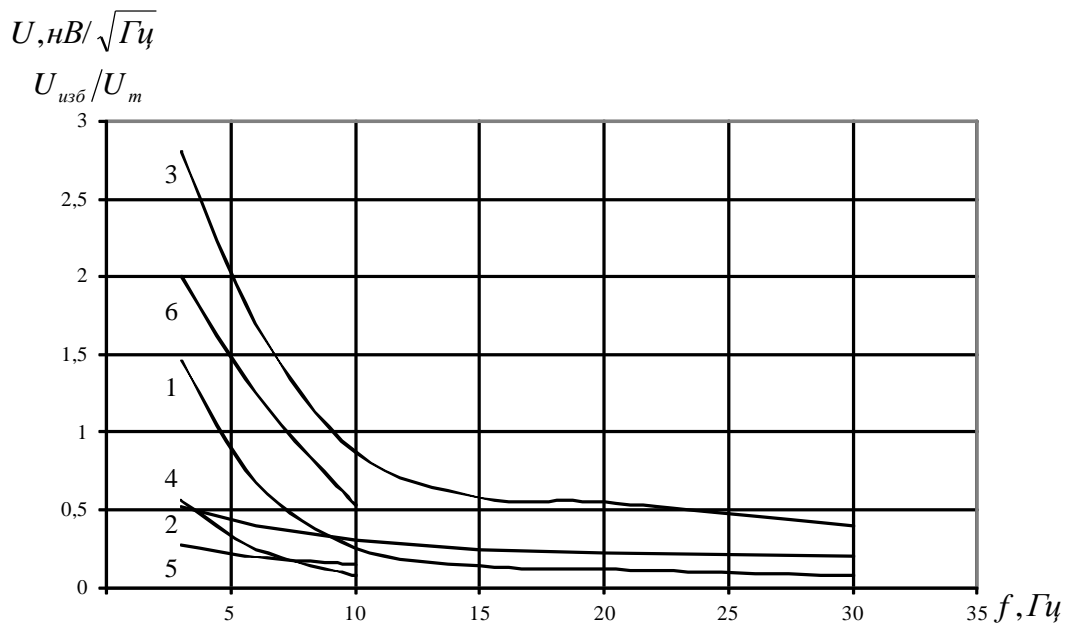


Рисунок 2.2 - Спектральные характеристики шумового напряжения танталовых электродов в неподвижном электролите. Кривые 1,4 – избыточный шум; 2,5 – тепловой шум; 3,6 – отношение избыточный/тепловой; 1,2,3 – электроды площадью  $54 \text{ см}^2$ ; 4,5,6 –  $360 \text{ см}^2$



химический шум, являющийся причиной превышения измеренного электродного шума над тепловым. Для исключения влияния собственного шума измерительного усилителя напряжение избыточного шума определялось по формуле

$$U_{изб} = \sqrt{U_{ш}^2 - U_{ш\text{ ус.}R}^2}, \quad (2.1)$$

где  $U_{ш}$  - измеренное среднеквадратичное значение напряжения шума с электродов,  $U_{ш\text{ ус.}R}$  - измеренное среднеквадратичное значение напряжения шума усилителя, ко входу которого подключено сопротивление  $R$ , равное активной части импеданса электродной ячейки. Точность измерения тепловой и избыточной компонент электродного шума можно считать примерно равной точности измерения активной составляющей импеданса  $R$ , то есть около 10 %.

Как видно из приведенных кривых, на нижней границе частотного диапазона, то есть на частоте 3 Гц, избыточный шум латунных электродов в 30...50 раз превышает величину теплового шума, а на частоте 30 Гц это превышение составило 5...6 раз. У танталовых электродов это превышение на частоте 3 Гц составляет менее 3 раз, а на частоте 30 Гц отношение избыточного шума к тепловому при площади электродов 54 см<sup>2</sup> составляет 0,4. Для танталовых электродов с площадью 360 см<sup>2</sup> возможности аппаратуры не позволили выполнить измерение сопротивления на частотах выше 10 Гц. Однако экстраполяция кривой 6 на рис. 2.2 позволяет утверждать, что для них на частоте 30 Гц это отношение не превышает 0,4. Таким образом, для электродов из тантала, который лучше, чем латунь, подходит для изготовления электродов датчика, на частотах выше 30 Гц с достаточной для практики точностью можно считать электродный шум равным тепловому. Измерения электродного шума на более высоких частотах подтвердили это положение. Поэтому частотный диапазон измерений был ограничен значением 30 Гц. В то же время у электродов из латуни избыточный шум заметно превышает тепловой вплоть до 100 Гц и более. Спектральные зависимости избыточного шума имеют характер  $f^{-\alpha}$ , при этом  $\alpha \approx 1,2$  для латуни и  $\alpha \approx 1,5$  для тантала. Спектральные характеристики теплового шума также имеют вид  $f^{-\alpha}$ , где  $\alpha = 0,2...0,5$  вследствие частотной зависимости величины  $R$ . Она обусловлена инерцией электродной ячейки.

трохимических процессов, протекающих на границе электрод-электролит, вследствие чего диссипация энергии протекающего электрического тока с ростом частоты уменьшается, уменьшается и активное сопротивление  $R$  [36] (Скорчеллетти). При увеличении площади электродов абсолютный уровень избыточного шума падает, однако при этом уменьшается и тепловой шум. Изменение площади латунных электродов от 24 до 185 см<sup>2</sup> (в 7,7 раз) на частоте 15 Гц приводило к изменению отношения  $U_{изб}/U_m$  всего на 14%. Причиной существования избыточных шумов в отсутствие движения у латунных электродов является электрохимическая коррозия. При коррозии на поверхности электрода образуется большое число локальных гальванических элементов, ЭДС которых в связи с растворением анодных участков не является постоянной. Особенно это характерно для технических металлов, имеющих неоднородную структуру и примесные включения, в частности для сплавов, к которым относится латунь. Поэтому и интегральная разность потенциалов между электродами испытывает флуктуации. У электродов, поверхность которых защищена плотной окисной пленкой, (например, у танталовых), величина этих флуктуаций значительно меньше, чем у латунных. Эксперименты показали, что с течением времени избыточный шум танталовых электродов уменьшался, однако и через несколько суток после начала измерений он вопреки данным [45] (Тягай) не исчезал и превышал по величине тепловой шум на частотах ниже 30 Гц. По-видимому, он связан с электрохимическими реакциями, обуславливающими рост окисной пленки на поверхности электрода. По литературным данным [49; 50] (Hladky, Halford) спектр электрохимического шума имеет индекс  $\alpha$  в пределах 1...2. Большие значения получаются при наличии дополнительной частотной фильтрации сопротивлением и емкостью контакта электрода с электролитом, в частности, двойным электрическим слоем. Показатель степени  $\alpha$  для танталовых электродов выше, чем для латунных. Это можно объяснить тем, что танталовые электроды имеют лучшие импедансные характеристики, чем латунные, то есть большую емкость и меньшее сопротивление потерь.

Зависимость избыточного шума электродов, покрытых слоем окисла, от их площади можно объяснить с помощью следующей модели. Пусть в окисном слое по поверхности электрода с площадью  $S$  равномерно распределены  $N \gg 1$  локальных некоррелированных одинаковых шумовых источников с внутренним сопротивлением  $r$  и среднеквадратической электродвижущей силой (ЭДС)  $\bar{e}$ . Число источников, приходящееся на единицу площади,  $n = N/S$ . Внутреннее сопротивление  $r$  определяется площадью  $S_0$ , занимаемой шумовым источником на поверхности электрода,  $S/NS_0 > 1$ .

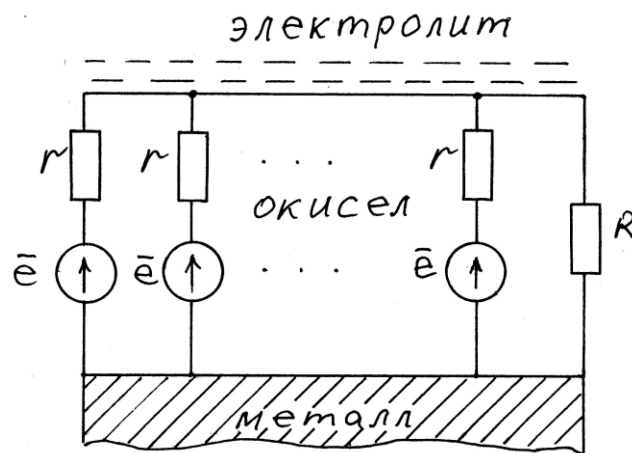


Рисунок 2.3 - Эквивалентная схема электрода с шумовыми источниками

Эквивалентная схема электрода с шумовыми источниками изображена на рисунке 2.3. Здесь  $R$  - сопротивление слоя окисла между поверхностью электрода и электролитом на площади  $S - NS_0$ , не занятой шумовыми источниками. При удельном сопротивлении окисла  $\rho$  и толщине слоя  $d$  значения  $r$  и  $R$  можно определить как  $r = \rho d / S_0$ ,  $R = \rho d / (S - NS_0)$ . Токи всех шумовых источников замыкаются через толщу окисного слоя, в том числе и через внутренние сопротивления других шумовых источников. В силу некоррелированности источников их взаимным влиянием можно пренебречь. Поэтому составляющая тока, протекающего через сопротивление  $R$  от одного источника, равна

$$\bar{I}_{u1} = \frac{\bar{e}}{r + \frac{(r/N)R}{(r/N) + R}} \cdot \frac{r/N}{R + r/N} \approx \frac{\bar{e}}{r + NR}. \quad (2.2)$$

Шумовые токи всех источников, протекая по сопротивлению  $R$ , складываются квадратично и создают на нем шумовое напряжение

$$\overline{U_u} = \frac{\bar{e}R\sqrt{N}}{r + NR} = \frac{\bar{e}}{\sqrt{N}(1 + r/NR)}. \quad (2.3)$$

Принимая во внимание, что  $N = Sn$ , а

$$\frac{r}{NR} = \frac{S - NS_0}{NS_0} = \frac{S}{NS_0} - 1,$$

получим

$$\overline{U_u} = \bar{e}S_0 \sqrt{\frac{n}{S}}. \quad (2.4)$$

Напряжение избыточного шума пропорционально  $S^{-0.5}$ . Напряжение теплового шума пропорционально  $R^{0.5}$ , следовательно, пропорционально  $S^{-0.5}$ . Поэтому отношение напряжения избыточного шума к напряжению теплового шума должно мало зависеть от площади электрода. Поскольку результирующее шумовое напряжение образуется при суммировании некоррелированных шумовых токов большого числа шумовых источников, то следует ожидать, что закон распределения такого шума близок к нормальному. Наш эксперимент подтвердил это предположение. Слабая зависимость отношения избыточного шума к тепловому от  $S$  была отмечена и в ранних исследованиях автора [63].

В диапазоне частот 30...200 Гц измерена спектральная плотность шумового напряжения титановых электродов, выдержанных в электролите 10 суток (рисунок 2.4). Электроды имели форму цилиндров с диаметром 10 мм с боковой рабочей поверхностью, площадь которой уменьшалась путем покрытия ее силиконовым герметиком. Увеличение измеренного шума на частотах ниже 100 Гц объясняется не только ростом избыточного, но и теплового шума вследствие частотной зависимости активной части импеданса электродной ячейки. С ростом частоты сопротивление между электродом и электролитом уменьшается, но это уменьшение ограничено сопротивлением растекания между электродами, которое было меньше 10 Ом. На частоте 30 Гц избыточный шум превышает тепловой шум и шум измерительного тракта в 2 раза. Величина измеренного шума при умень-

шении площади в 4 раза от  $12,6 \text{ см}^2$  до  $3,1 \text{ см}^2$  увеличилась практически в 2 раза с  $1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  до  $2,1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ , что соответствует (3). Коэффициент шума предварительного усилителя с входным трансформатором не превышал 1 дБ на частоте 30 Гц и 1,5 дБ на частоте 200 Гц, поэтому ошибка измерений не превышает 20 %. Шумовая ЭДС измерительного тракта, приведенная к его входу, составляла  $0,32 \dots 0,35 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  во всем диапазоне частот.

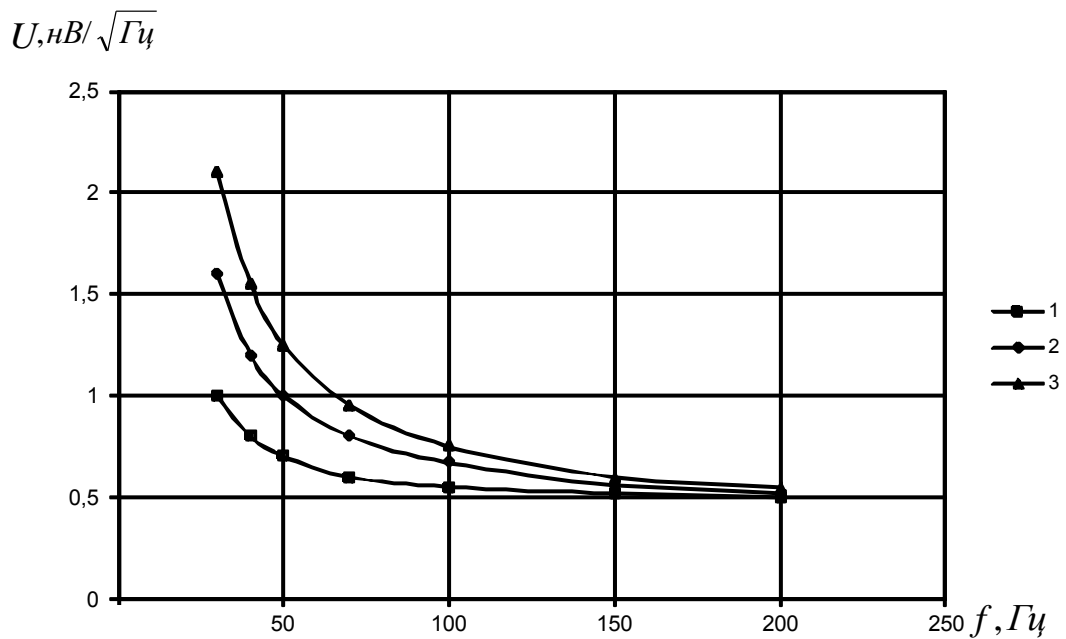


Рисунок 2.4 - Спектральные характеристики шумового напряжения титановых электродов в неподвижном электролите. 1,2,3 – электроды площадью  $12,56 \text{ см}^2$ ;  $6,28 \text{ см}^2$  и  $3,14 \text{ см}^2$  соответственно. ЭДС шума измерительного тракта -  $0,32 \dots 0,35 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  во всем диапазоне частот

Некоторое изменение отношения напряжения избыточного шума к напряжению теплового шума  $U_{изб}/U_m$  при изменении площади электродов в экспериментах объясняется неравномерным распределением шумовых источников по поверхности электродов. Эти источники могут быть частично коррелированы, так как процесс окисления металла связан с потреблением кислорода из приэлектродного слоя электролита, и колебания концентрации кислорода в приэлектродном слое сказываются на величине ЭДС многих локальных шумовых источников. Легко показать, что в случае полностью коррелированных источников

напряжение шума  $\overline{U_{ш}}$  не зависит от площади электрода. Как видно из рис. 2.4, на частоте 30 Гц влиянием шума измерительного тракта можно пренебречь. Спектральный индекс  $\alpha$  для избыточного шума титановых электродов близок к единице, причем избыточный шум превышает тепловой на частотах ниже 100 Гц. На частоте 30 Гц это превышение составляет около 2 раз, что больше, чем у тантала. По мнению автора, это вызвано большей шероховатостью поверхности, связанной со сложностью полировки боковой поверхности цилиндра.

Также измерен шум электродов с площадью  $54 \text{ см}^2$  из латуни той же марки, но изготовленных из другой заготовки. Значение спектральной плотности электродного шума составило  $40 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 3 Гц и  $2 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 30 Гц. Это в 25 раз на частоте 3 Гц и в 10 раз на частоте 30 Гц больше, чем у танталовых электродов той же площади. В диапазоне 3...10 Гц проведено сравнение спектральной плотности шума выдержанных в электролите в течение 4000 часов электродов с площадью  $0,78 \text{ см}^2$  из тантала, никеля, ниобия и бронзы марки КМЦ, а также выдержанных в электролите в течение 6 часов танталовых электродов, рабочая поверхность которых не была подвергнута полировке. Электродный шум у длительно выдержанного тантала, никеля и ниобия примерно одинаков и в 3...4 раза выше теплового. Бронзовые и недавно помещенные в электролит неполированные танталовые электроды имели примерно одинаковое напряжение шума, в 3...4 раза большее, чем длительно выдержанные танталовые. Сравнение медных и латунных электродов одинаковой площади  $12,6 \text{ мм}^2$  показало, что в отсутствие движения медные электроды имеют спектральную плотность электродного шума на частоте 3 Гц в 3 раза, а на частоте 30 Гц - в 1,5 раза больше, чем латунные. Выполнено сравнение шума у покоящихся электродов из титана, тантала и электродов с покрытием из золота и палладия по медной основе. Все электроды имели рабочую поверхность в виде круга диаметром 6 мм. Несмотря на то, что золото и палладий являются химически стойкими некорродирующими металлами, на частоте 10 Гц спектральная плотность шумового напряжения у позолоченных электродов в 1,4 раза, а у палладирированных – в 5 раз больше, чем у танта-

ловых и титановых (он практически одинаков). Причину такого повышенного уровня шума можно объяснить пористой структурой покрытия, в результате чего становится заметен коррозионный шум медной основы. Следовательно, применение в электродных датчиках электромагнитного поля меди и медных сплавов, а также покрытий из благородных металлов, нецелесообразно, так как они имеют высокий уровень шума по сравнению с длительно выдержанным в электролите танталом, титаном, никелем, ниобием. Шероховатость поверхности и недостаточное время выдержки в электролите значительно увеличивает шум даже у электродов из тантала, который является одним из лучших из исследованных материалов по величине электродного шума. По мнению автора, в течение первых нескольких суток после помещения в электролит на поверхности электродов идет быстрое образование окисной пленки, сопровождающееся значительным электродным шумом. Наличие острых кромок и шероховатостей увеличивают скорость реакции окисления и увеличивают электродный шум. Наш опыт показал, что для некорродирующих металлов требуется не менее трех суток выдержки в электролите, чтобы величина электродного шума уменьшилась до значений, близких к тепловому шуму и стабилизировалась. При этом с увеличением времени выдержки тенденция к уменьшению электродного шума сохраняется.

Установлено, что сразу после погружения электродов из титана в раствор NaCl с концентрацией 35 г/л наблюдается специфический «взрывной» шум в виде импульсов с амплитудой, в десятки раз превосходящей среднеквадратическое значение шума между импульсами, следующих с интервалами от долей секунды до единиц секунд. С течением времени интервалы между импульсами увеличиваются до полного исчезновения импульсов через 2...3 суток. После механического повреждения поверхности электродов (царапина) снова появляется интенсивный импульсный шум, который уменьшается лишь примерно через 20 часов и полностью исчезает более чем через сутки. Также после каждого просушивания электродов на воздухе требуется не менее 6 часов для устранения импульсного шума. Спектральный анализ импульсного шума показал, что основная энергия импульсов сосредоточена в диапазоне частот ниже 40 Гц, однако и на частотах 70 - 200

Гц наблюдается увеличение спектральной плотности шума в 2...1,5 раза. В качестве гипотезы автор предполагает, что импульсный шум является следствием скачкообразного процесса смачивания поверхности и адсорбции ионов кислорода при формировании двойного электрического слоя на поверхности электрода. Устранение такого шума (назовем его адсорбционным) достигается выдержкой датчика в электролите в течение 3...5 суток. Наш опыт показал, что при замкнутых между собой электродах импульсы исчезают быстрее.

Проведена серия лабораторных экспериментов по изучению электродного шума в процессе его установления. Исследуемые электроды, выполненные из нержавеющей стали, находились в неподвижном состоянии в растворе NaCl с концентрацией 35 г/л (соленость воды в океане). Они были сгруппированы в несколько секций, которые можно было соединять параллельно, изменяя тем самым площадь электродов  $S$  от 1 мм<sup>2</sup> до 63 мм<sup>2</sup>, рабочая поверхность электродов отшлифована. Через малошумящий усилитель (коэффициент шума 2...3 дБ) пара электродов одинаковой площади подключалась к аналого-цифровому преобразователю E20-10 фирмы L-Card. Электродный шум в период его установления представляет собой нестационарный случайный процесс, статистические характеристики которого (функция распределения, амплитудный спектр) медленно изменяются. Если исключить начальную стадию этого периода (менее 0,5 часа), то изменения характеристик шума за время измерения, исчисляемое единицами минут, несущественны. Для измерения статистических характеристик электродного шума производилась запись серии из 20 шумовых реализаций длительностью 1,1 секунды. При такой длительности шумовой реализации шум считался стационарным. Затем производилась их цифровая обработка и усреднение результатов по ансамблю.

В первые часы после погружения электродов в электролит наблюдался интенсивный импульсный шум. При этом в промежутках между импульсами наблюдался «гладкий» шум значительно меньшей интенсивности. После выдержки электродов площадью  $S = 1$  мм<sup>2</sup> в электролите в течение  $t = 3$  часов время действия импульсов составляло около 16% от времени наблюдения,



средний интервал между импульсами составил 3...5 с. Амплитуда импульсов превышала величину среднеквадратического напряжения шума  $\sigma$  между импульсами в 10...150 раз. Под шумовым импульсом мы понимаем скачкообразное кратковременное увеличение шумового напряжения, на порядок и более превышающее значение  $\sigma$  в промежутках между импульсами. Форма наиболее часто встречающихся импульсов показана на рисунке 2.5. Остроконечные им-

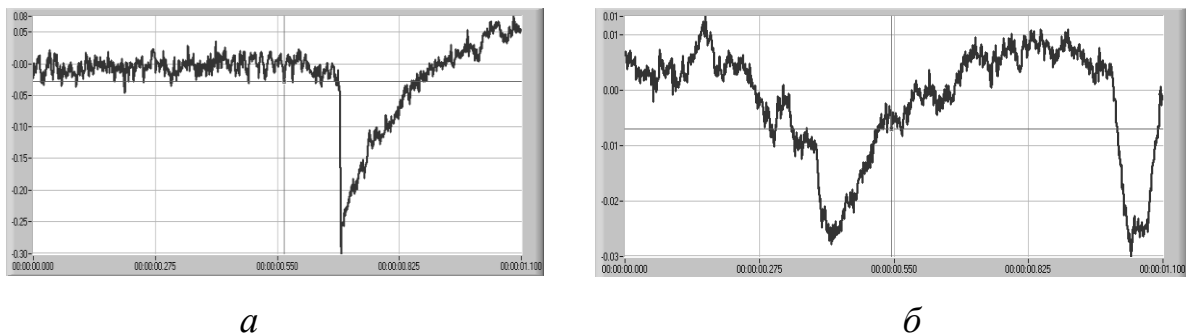


Рисунок 2.5 - Форма наиболее часто встречающихся шумовых импульсов

пульсы (рисунок 2.5 а) составляли 20 % всех импульсов и имели длительность около 0,1 с. Остальные представляли собой вспышки случайных низкочастотных колебаний с длительностью до нескольких секунд (рисунок 2.5 б). Именно они и оказывали основное влияние на статистические характеристики электродного шума. У электродов с площадью  $S = 1 \text{ мм}^2$  с течением времени средний интервал между импульсами увеличивался и при времени выдержки в электролите  $t = 48$  часов достиг 50...60 секунд. Однако даже после 6 суток выдержки электродов в растворе не удалось полностью избавиться от импульсного шума. Относительное время действия импульсов уменьшалось по закону  $\tau/T = 0,17 \exp(-0,018t)$  ( $\tau$  - суммарное время действия импульсов,  $T$  - время наблюдения,  $t$  - время выдержки в часах) и к концу измерений ( $t = 148$  часов) составляло около 1% от времени наблюдения. Амплитуда импульсов также уменьшилась в 3...50 раз, оставаясь при этом в 50...180 раз больше, чем  $\sigma$  «гладкого» шума между импульсами. На рисунке 2.6 показана функция распределения шума электродов с  $S = 35 \text{ мм}^2$ , выдержанных в электролите  $t = 72$  часа, на входе аналого-цифрового преобразова-

теля при наличии импульсов вида, показанного на рисунке 2.5 б, а на рисунке 2.7 – функция распределения шума тех же электродов в отсутствие импульсов (выбраны шумовые реализации без импульсов). На этих рисунках также показана гауссовская функция распределения, рассчитанная по измеренной дисперсии шума. Наличие импульсной составляющей более чем в 30 раз увеличивает дисперсию шума и делает его функцию распределения негауссовской (рисунок 2.6). График ее становится изрезанным и широким с отрицательным коэффициентом эксцесса ( $E = -1$ ). В этом измерении импульсы наблюдались в 8 из 20 шумовых реализаций сеанса. Закон распределения вероятностей при большом числе шумовых импульсов в виде всплесков низкочастотных колебаний (рисунок 2.5 б), в пределах от минимального до максимального значения шумового напряжения приближается к равномерному. В отсутствие шумовых импульсов функция распределения практически не отличается от гауссовской (рисунок 2.7).

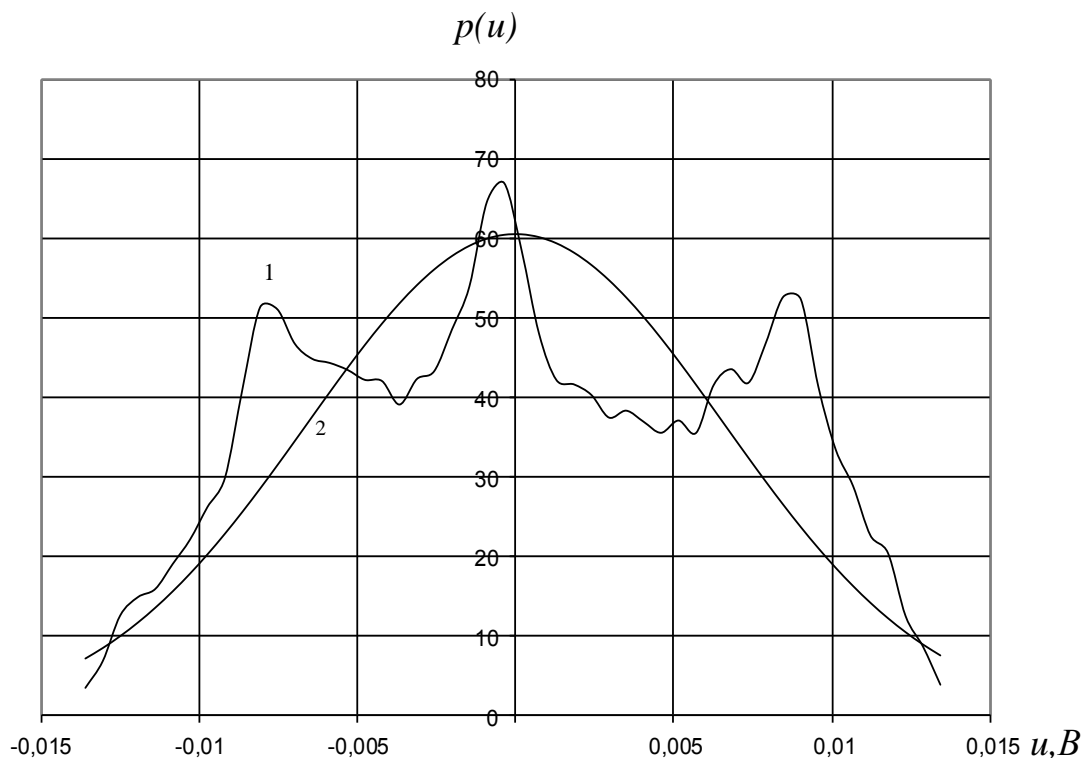


Рисунок 2.6 - Функция распределения шума электродов из нержавеющей стали с  $S = 35 \text{ мм}^2$ , выдержанных в электролите  $t = 72$  часа (1), и расчетная гауссовская функция распределения (2) при той же дисперсии

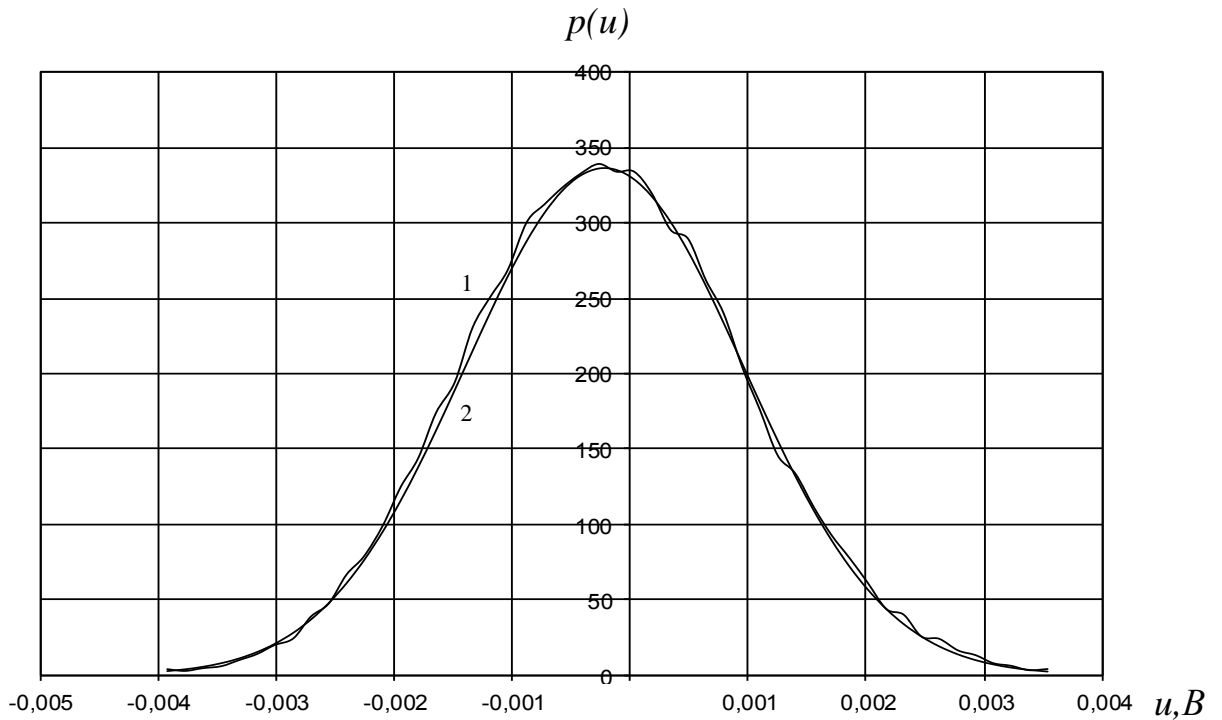


Рисунок 2.7 - Функция распределения шума электродов при отсутствии импульсов (1) и расчетная гауссовская функция распределения (2) при той же дисперсии

При времени выдержки в электролите  $t=12$  часов функция распределения шума этих же электродов показана на рисунке 2.8. Она также имеет более плоскую по сравнению с гауссовской вершину при одинаковом значении дисперсии, коэффициент эксцесса  $E = -0,8$ . Его значение меньше, чем для кривой на рисунке 2.6. Это объясняется тем, что при небольшом времени выдержки велика составляющая «гладкого» шума, поэтому влияние шумовых импульсов на функцию распределения меньше. Среднеквадратическое значение напряжения шума  $\sigma$  здесь примерно в два раза больше, чем для кривой на рисунке 2.6. Увеличение площади электродов приводило, как правило, к уменьшению амплитуды импульсов (в 10...90 раз при увеличении площади в 63 раза), величина  $\sigma$  шума также уменьшалась. На рисунке 2.9 показаны усредненные спектры приведенного ко входу усилителя шумового напряжения  $\bar{u}$  в децибелах по отношению к  $1 \text{ В}/\sqrt{\text{Гц}}$  для электродов различной площади при времени выдержки в электролите  $t = 72$  часа. Увеличение площади  $S$  от  $1 \text{ мм}^2$  в 35, 42 и 63 раза приводило к уменьшению  $\sigma$  на частоте 100 Гц соответственно на 10,2; 13,6 и 24 дБ. На частотах ниже 30 Гц на

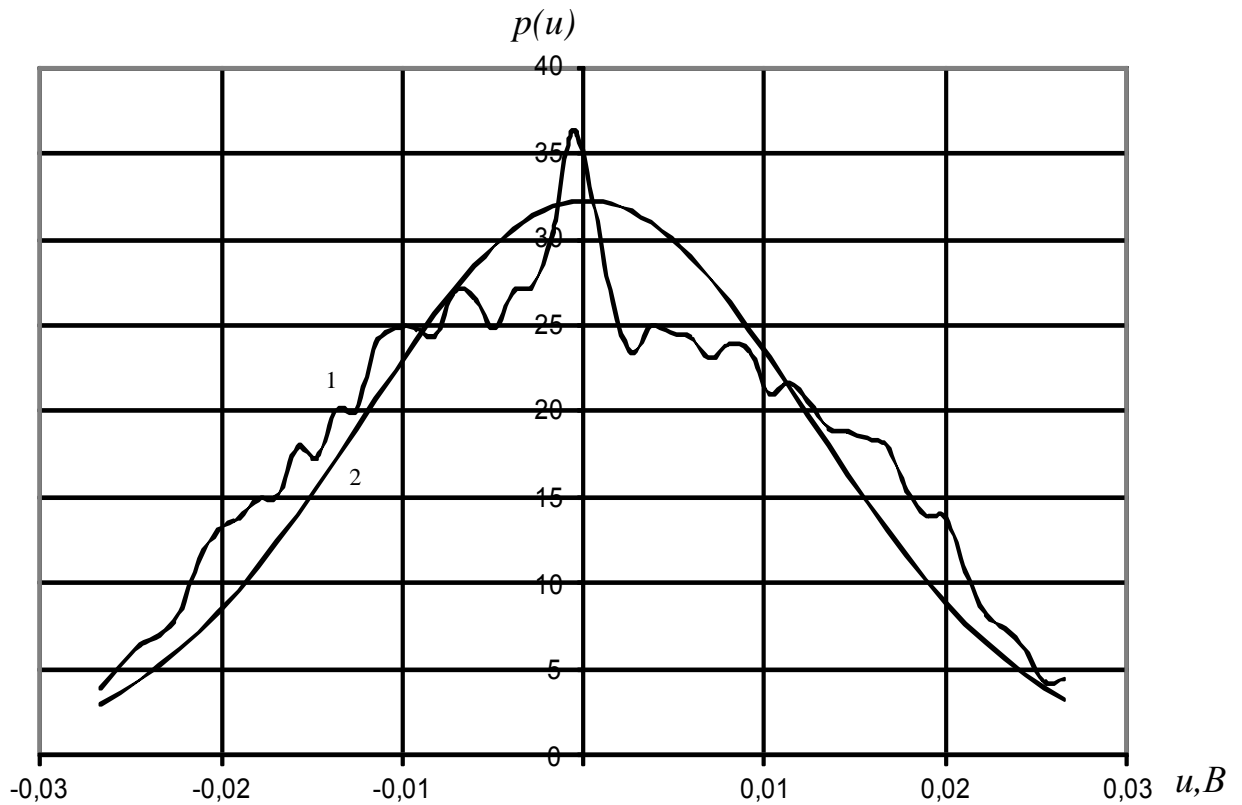


Рисунок 2.8 - Функция распределения шума электродов при 12 – часовой выдержке в электролите (1) и расчетная гауссовская функция распределения (2) при той же дисперсии

спектральную плотность шума большое влияние оказывают шумовые импульсы, поэтому спектральные характеристики шума для электродов разной площади могут сближаться. Например, на частоте  $f = 3$  Гц при большом количестве импульсов шум электродов с площадью  $S = 35 \text{ мм}^2$  превысил шум электродов с  $S = 1 \text{ мм}^2$ . Иногда увеличение площади приводило к увеличению импульсного шума, что можно объяснить дефектами поверхности некоторых электродов. На рисунке 2.10 показаны спектры приведенного ко входу усилителя шумового напряжения  $\bar{u}$  для электродов с площадью  $S = 35 \text{ мм}^2$  после 72-часовой выдержки в электролите при наличии шумовых импульсов и при их отсутствии. Также для сравнения приведен спектр шумового напряжения этих же электродов при  $t = 12$  часов. При наличии импульсов наблюдается увеличение спектральной плотности шума на частотах ниже 100 Гц. Однако если это увеличение на частоте  $f = 60$  Гц составило 1,5 дБ, то на частоте  $f = 5$  Гц оно достигает 7,5 дБ, а на  $f = 3$  Гц уже 12,5 дБ.

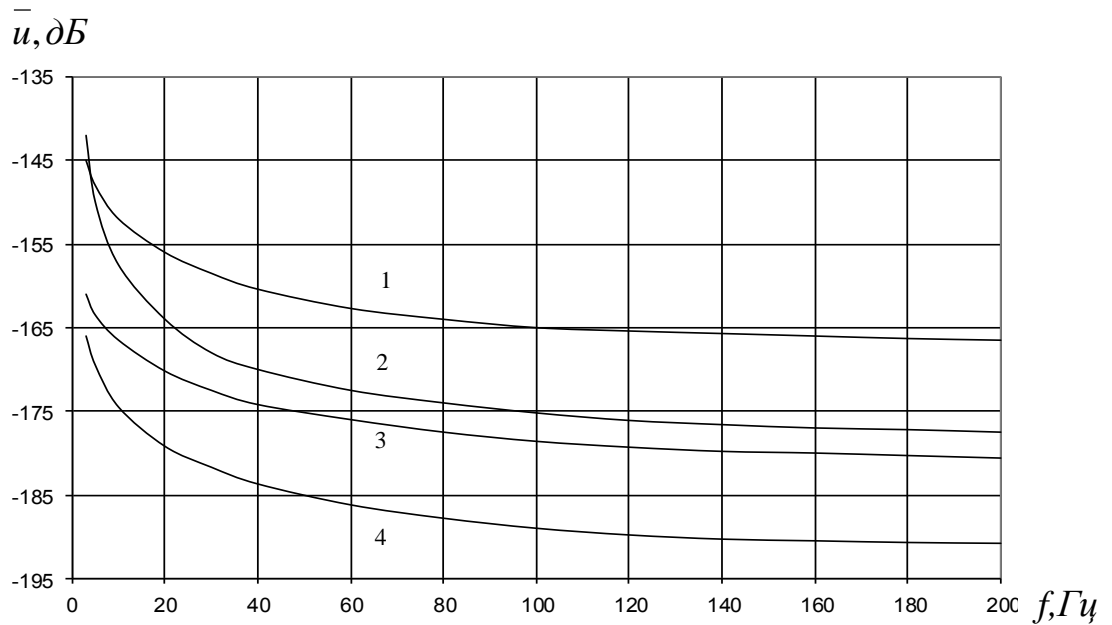


Рисунок 2.9 - Усредненные спектры приведенного ко входу усилителя шумового напряжения при времени выдержки в электролите  $t = 72$  часа при разной площади  $S$  электродов из нержавеющей стали. Кривые 1, 2, 3 и 4 сняты при площади  $S$  соответственно 1, 35,42 и 63 мм<sup>2</sup>

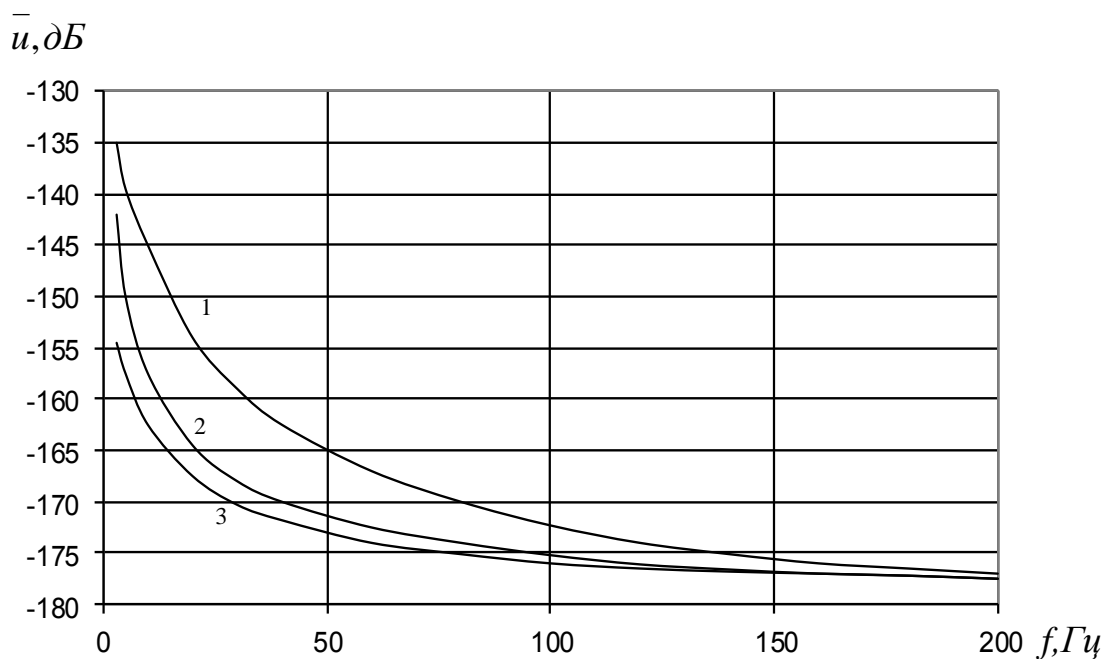


Рисунок 2.10 - Спектры приведенного ко входу усилителя шумового напряжения  $\bar{u}$  для электродов из нержавеющей стали с площадью  $S = 35$  мм<sup>2</sup>. 1- время выдержки в электролите  $t = 12$  часов. 2, 3 - время выдержки в электролите  $t = 72$  часов при наличии (2) и отсутствии (3) шумовых импульсов

То есть импульсы дают существенный вклад в спектральную плотность шума только на очень низких частотах. Уменьшение спектральной плотности напряжения шума  $\bar{u}$  на частоте  $f = 20$  Гц при выдержке электродов от 12 до 72 часов составило 10...13 дБ. На частотах выше 140 Гц измеренный шум всех длительно выдержанных в электролите электродов (при  $t \geq 72$  часа) близок к тепловому. При малом времени выдержки  $t = 12$  часов шум у электродов с  $S = 35$  мм<sup>2</sup> на частотах 140...200 Гц имел превышение на 1...2 дБ по напряжению над тепловым шумом, спектральная характеристика которого тоже падает с ростом частоты вследствие уменьшения активной составляющей импеданса [65].

Между измерениями предварительный усилитель, к которому непосредственно подключались электроды, был выключен. После подачи на него питающего напряжения перед измерением, как правило, наблюдался интенсивный шум в виде остrokонечных импульсов и вспышек низкочастотных колебаний, который быстро уменьшался и стабилизировался через 3...10 минут. После этого производилось измерение. Если не выключать усилитель, то с течением времени импульсный шум постепенно уменьшается, и через 5...6 часов интервалы между импульсами достигают единиц минут. При этом становится возможным выбрать шумовую реализацию без импульсов. Однако при выключении предварительного усилителя на время более 10 минут и повторном включении импульсы и вспышки шума появляются снова. С увеличением времени выдержки электродов в электролите этот эффект становится менее заметен. У электродов с площадью не менее 7 мм<sup>2</sup>, как правило, импульсный шум полностью исчезал при общем времени выдержки в электролите более 2 суток, а у электродов с площадью 1 мм<sup>2</sup> дожидаться полного исчезновения импульсов не удалось и через 6 суток. Наблюдалось аномальное поведение шума одной из секций электродов, у которой время от времени возникал интенсивный импульсный шум. При отключении этой секции от исследуемых электродов импульсный шум исчезал. Визуальный осмотр показал наличие дефектов в лакокрасочном покрытии, изолирующем боковую поверхность электродов. Природа возникновения шумовых импульсов осталась невыяс-

ненной. Однако в экспериментах установлено, что на величину импульсного электродного шума существенное влияние оказывает состояние поверхности электродов, в частности, ее шероховатость. Наличие острых кромок и шероховатостей увеличивают электродный шум даже у электродов из тантала, который является одним из лучших исследованных материалов по величине электродного шума. При полировке электродов до зеркального блеска шумовые импульсы исчезают в несколько раз быстрее, чем при более грубой шлифовке.

Динамика импульсного шума зависит также от типа используемого предварительного усилителя. Эквивалентная схема электродного датчика представляет собой конденсатор с потерями. Если датчик подключен к усилителю, имеющему на входе разделительный конденсатор (обычно электролитический), то процесс заряда емкости датчика при подаче напряжения питания на усилитель резко активизирует электрохимические процессы на поверхности электродов, что приводит к появлению сильных шумовых импульсов и вспышек шума. Все приведенные выше результаты получены именно с предварительным усилителем, имеющим на входе разделительный электролитический конденсатор. Измерения показали, что после включения усилителя с конденсаторным входом между электродами устанавливается постоянная разность потенциалов в 0,4...0,8 В. Если же электроды подключены к усилителю через входной трансформатор, то постоянная разность потенциалов между электродами равна нулю, а процесс установления шума происходит значительно быстрее, в течение получаса. В дальнейшем выключение питания усилителя не сказывается на электродном шуме. Несколько худший результат получается при шунтировании датчика резистором, сопротивление которого много больше сопротивления электродного датчика, но много меньше входного сопротивления усилителя (в нашем эксперименте резистор 9,1 кОм при сопротивлении датчика 600 Ом на частоте 120 Гц и входном сопротивлении усилителя 60 кОм). В этом случае время установления шума сокращается с шести до двух часов, уменьшается и импульсный шум при повторных включениях. Установившаяся постоянная разность потенциалов между электродами в этом случае составляет единицы милливольт.

Поверхность электрода из нержавеющей стали, как и из других некорродирующих металлов, кроме благородных, при погружении в водный электролит окисляется. При этом образуется плотный слой окисла, являющегося диэлектриком с потерями. На поверхности окисла формируется двойной электрический слой, подобный конденсатору, внутренняя обкладка которого образована адсорбированными ионами кислорода, а внешняя – противоионами электролита. С протеканием электрохимической реакции окисления связано наличие специфического нетермодинамического, так называемого избыточного электродного шума. При шероховатой поверхности электрода скорость реакции окисления металла возрастает, возрастает и уровень избыточного шума. Образование плотной окисной пленки переводит металл электрода в пассивное состояние. Потенциал поверхности электрода относительно электролита при этом обычно сдвигается в положительную сторону. Ионы хлора же способствуют разрушению пассивирующей окисной пленки и смещению потенциала электрода в отрицательную сторону. Наличие в электролите пассиватора (ионов кислорода) и активатора (ионов хлора), особенно на начальном этапе образования окисной пленки, может привести к значительным колебаниям потенциала электрода, то есть к вспышкам избыточного шума [35] (Фрумкин).

С увеличением времени выдержки электродов в электролите растет толщина слоя окисла, поверхность электрода становится более однородной, электродный шум уменьшается. Однако, как показали наши исследования, даже длительно выдержанные в электролите электроды помимо тепловой составляющей имеют избыточный шум, величина которого на частотах ниже 30 Гц может превышать значение теплового шума [64]. Включение-выключение питания усилителя с увеличением времени выдержки все меньше сказывается на величине шума электродного датчика. Процесс образования двойного электрического слоя на поверхности благородных металлов (золото, платина) тоже связан с адсорбцией ионов кислорода.

Остроконечные шумовые импульсы на выходе электродного датчика является следствием скачкообразного изменения заряда на электродах. Изменение за-



ряда электрода может быть связано с протеканием процессов адсорбции-десорбции ионов кислорода, которые могут иметь скачкообразный характер. Процесс адсорбции является довольно медленным, и стабилизация параметров двойного электрического слоя может происходить только через несколько часов выдержки электродов в электролите [35] (Фрумкин). В течение этого времени можно ожидать и существование таких импульсов, что согласуется с нашим экспериментом. Анализ результатов эксперимента показывает, что импульсы остроконечной формы (рисунок 2.5а), наблюдавшиеся на электродах минимальной площади, преимущественно имели одинаковую полярность, что говорит о направленном изменении заряда электрода. То есть причина возникновения остроконечных шумовых импульсов может быть иной, чем у всплеск случайных колебаний напряжения на электродах. Локальными источниками таких импульсов являются области с некоррелированными скачкообразными изменениями адсорбированного заряда. Дисперсия случайного заряда этих источников на поверхности электрода суммируется. В случае равномерного распределения по поверхности электрода локальных источников импульсов среднеквадратическое отклонение заряда электрода увеличивается пропорционально  $S^{0.5}$ . Емкость датчика при этом увеличивается пропорционально площади. Следовательно, можно ожидать, что зависимость спектральной плотности напряжения адсорбционного шума от площади электрода такая же, как и у ранее рассмотренного избыточного шума, то есть пропорциональна  $S^{-0.5}$ .

Импульсный шум характерен не только для электродов из нержавеющей стали, но и из других металлов. В частности, он существует у электродов из тантала и титана и даже у позолоченных электродов. Исследование динамики нестационарного шума у датчика с электродами, имеющими золотое покрытие, показало, что шумовые импульсы прекращались через 1...2 часа, то есть несколько быстрее, чем у датчика с электродами из нержавеющей стали. Примерно так же ведут себя и электроды из тантала и титана. Однако золотое покрытие уже через двое суток начало разрушаться. На электродах появились очаги коррозии, и им-

пульсный шум появился снова. Если электроды выполнены из корродирующего металла (например, меди, латуни) с покрытием из благородного или некорродирующего металла, то величина и характер электродного шума зависит от качества покрытия. Как правило, любое покрытие обычно имеет сквозные поры, в результате чего возникает точечная (питтинговая) коррозия электрода. При этом возникает импульсный шум, который в наших экспериментах с электродами, имеющими покрытия из никеля и хрома, на некоторое время устранялся путем изоляции поврежденного участка покрытия с помощью краски. Таким образом, применение электродов с покрытиями из некорродирующих металлов нецелесообразно. Любые повреждения поверхности электродов, в том числе изготовленных из сплошного металла, приводят к длительному процессу установления шума (часы), на начальном этапе имеющего импульсную составляющую. При этом даже трансформаторное подключение датчика к усилителю не устраняет импульсный шум. На титановых электродах площадью  $12,6 \text{ см}^2$  он продолжался несколько часов и установился лишь через 20 часов. Но при движении электродов в электролите шум на частоте 20 Гц оставался до 2,5 раз выше, чем до нарушения целостности поверхности. Повреждение на площади 1% золотого покрытия по латуни после прекращения импульсов увеличивало электродный шум на частоте 20 Гц до двух раз. После просушивания электродов при их повторном замачивании процесс установления шума с импульсной составляющей повторяется, хотя и более короткое время.

Итак, наши исследования показали, что в течение первых нескольких суток после помещения электродов в электролит существует большая импульсная составляющая электродного шума, а также вспышки электродного шума, амплитуда которых на 1...2 порядка превышает значение  $\sigma$  шума в промежутках между импульсами. При приеме или измерении слабых электромагнитных полей это неизбежно приведет к перегрузке чувствительного приемника и может сделать прием вообще невозможным. Чтобы этого не случилось, входные каскады приемника должны иметь большой динамический диапазон. Если спектр принимаемого сигнала лежит выше 100 Гц, то применение частотной фильтрации в предваритель-

ном усилителе может быть достаточным для обеспечения нормального приема. Если же спектр принимаемого сигнала лежит в области единиц-десятков герц, то в таком случае целесообразно применение ограничителей шума или устройств типа управляемых прерывателей, которое даст увеличение отношения сигнал-шум на выходе приемника [7] (Бернштейн).

Целесообразно выполнять электроды датчика в виде коммутируемых секций, чтобы иметь возможность исключить из работы anomalно шумящие секции. Площадь каждого электрода не должна быть меньше  $10 \text{ мм}^2$ . В этом случае закон распределения шума электродов, выдержанных в электролите не менее нескольких суток, близок к нормальному гауссовскому. Наиболее эффективной мерой борьбы с нестационарным электродным шумом является применение входного трансформатора, который служит для оптимального согласования датчика с предварительным усилителем [65]. Малое сопротивление первичной обмотки способствует быстрому исчезновению шумовых импульсов. Если применение входного трансформатора нецелесообразно (например, из-за свойственного ему микрофонного эффекта), то датчик следует зашунтировать резистором такого номинала, чтобы его влияние на передачу сигнала было минимальным. Поверхность электродов должна быть тщательно отполирована, а изолирующие покрытия не должны иметь трещин и отслоений. Следует избегать применения электродов из корродирующего металла с некорродирующим металлическим покрытием. При эксплуатации электродного датчика необходимо тщательно оберегать поверхность электродов от повреждений, которые могут стать причиной длительной неработоспособности датчика.

Таким образом, в отсутствие движения электролита шум электродного датчика состоит из трех независимых компонент: теплового шума активной части импеданса, коррозионного шума и адсорбционного шума. При этом сумму двух последних компонент мы называем избыточным шумом.

## 2.2. Составляющие импеданса электродных датчиков

Активная составляющая импеданса датчика  $R$  определяет величину его теплового шума. Поскольку тепловой шум является принципиально неустранимой компонентой шума датчика и определяет минимальное его значение, то величина активного сопротивления датчика определяет его предельную чувствительность. Реактивная составляющая импеданса  $C$  оказывает влияние на частотную характеристику входной цепи приемного или измерительного устройства. Значения  $R$  и  $C$  определяют также условия оптимального согласования по шумам датчика с предварительным усилителем. Таким образом, важно знать как абсолютные значения  $R$  и  $C$  на разных частотах, так и стабильность их во времени. В простейшем случае эквивалентная электрическая схема электродного датчика для переменного тока аналогична схеме электрохимической ячейки, представляющей собой пару электродов, погруженных в раствор электролита [36] (Скорчеллетти). Она включает в себя сопротивление растекания между электродами  $r$ , а также сопротивление и емкость контакта электродов с электролитом. В соответствии с [34] (Смайт), сопротивление растекания  $r$  зависит от электрической проводимости электролита и геометрии датчика. Сопротивление и емкость контакта электрода с электролитом в значительной степени определяются параметрами двойного электрического слоя, существующего на границе между жидкостью и твердой поверхностью, который может рассматриваться как конденсатор с потерями [35-37]. Однако многие применяемые для изготовления электродов некорродирующие металлы, как, например, титан, тантал, никель, ниобий, нержавеющая сталь, имеют на своей поверхности плотную диэлектрическую пленку, которая и обуславливает их стойкость к воздействию агрессивной среды. Эта диэлектрическая пленка образует конденсатор с потерями, обкладками которого являются металл электрода и окружающий электролит. В этом случае двойной электрический слой формируется на поверхности окисной пленки. Как сопротивления потерь, так и емкости обоих конденсаторов зависят от частоты. В предыдущем разделе указывалось, что частотная зависимость контактного сопротивления связана с инерцией

электрохимических процессов. Согласно [35; 56] (Фрумкин, Дамаскин) увеличение контактной емкости на низких частотах обусловлено адсорбционными явлениями, которые протекают весьма медленно. С ростом частоты адсорбированный заряд не успевает следить за изменением потенциала электрода и емкость уменьшается до некоторого минимального значения, которое определяется структурой двойного слоя. Исследования окисных слоев показали, что они не являются вполне однородными. В частности, в них обнаружены поры и микротрещины, которые увеличивают емкость и сопротивление потерь по сравнению со сплошной пленкой окисла [35; 38] (Фрумкин, Одынец). На рисунке 2.11 изображена эквивалентная схема датчика, в которой под  $R_э$  и  $C_э$  подразумеваются зависящие от частоты результирующие сопротивление и емкость между металлом электрода и электролитом при последовательной схеме замещения,  $r$  – сопротивление растекания между электродами. От эквивалентной схемы, приведенной в [12] (Кочанов, Зимин), она отличается лишь тем, что использована последовательная схема

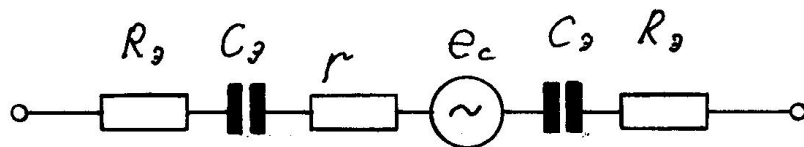


Рисунок 2.11 - Упрощенная эквивалентная электрическая схема электродного датчика

замещения контакта электрода с электролитом. Это удобнее для определения теплового шума датчика. Непосредственно могут быть измерены параметры простейшей эквивалентной схемы датчика, изображенной на рисунке 2.12, которые связаны с параметрами схемы на рисунке 2.11 следующими соотношениями:  $C = C_э/2$ ,  $R = 2R_э + r$ . Активное сопротивление  $R$  является суммой сопротивления растекания  $r$  и контактного сопротивления электродов  $r_{эл} = 2R_э$ , включающего в себя сопротивление двойного электрического слоя и сопротивление потерь в окисной пленке. Именно оно и является источником теплового шума.

Емкость  $C$  представляет собой последовательно соединенные емкость двойного электрического слоя и емкость конденсаторов, образованных окисной пленкой. Величина сопротивления растекания  $r$  ограничена снизу конструктивными возможностями, поэтому одним из путей уменьшения активного сопротивления датчика является подбор материала электродов, обеспечивающего минимальное значение  $R$  и максимальное значение  $C$  при условии стабильности их во времени. Материал для изготовления электродов должен удовлетворять следующим требованиям. Он должен быть стойким к длительному воздействию морской воды, обладать низким и стабильным значением активного сопротивления  $R$ , высоким и стабильным значением емкости  $C$ , иметь достаточную прочность и быть технологичным в обработке. Таким требованиям удовлетворяют металлы, имеющие на поверхности плотную защитную пленку окисла (например, титан, тантал и др.), или благородные металлы (золото, платина, палладий), однако последние

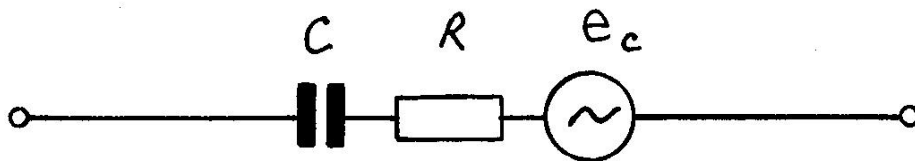


Рисунок 2.12 - Эквивалентная схема электродного датчика, соответствующая измеряемым параметрам  $R$  и  $C$

слишком дороги. Согласно [12] (Кочанов, Зимин) лучшие импедансные характеристики в диапазоне частот 0,3...300 Гц имеют кадмий и бронза марки БрАЖ. При этом сопротивление и емкость электрода относительно электролита при параллельной схеме замещения пропорциональны частоте с показателем степени  $\alpha = -(0,2...0,5)$  и  $\beta = -(0,3...0,7)$  соответственно.

Простейшей моделью датчика, пригодной для исследования импеданса, является электрохимическая ячейка в виде пары идентичных металлических электродов в электролите, близком по составу к морской воде. Нами исследованы параметры импеданса электродов из следующих материалов: тантала, титана ВТ-10, ниобия НБП-1, бронзы КМЦ, меди М1, латуни ЛС-59, никеля, стали не-

ржавеющей X18H9T, а также покрытий по меди и медным сплавам из хрома, золота, кадмия, никеля, белого цинка. Для большинства из них эти исследования проведены впервые, лишь некоторые из них исследованы в [12]. Значения  $R$  и  $C$  измерялись на частотах 10, 30, 90, 270 и 1000 Гц с помощью моста переменного тока Р568 с индикатором Ф550, который после некоторой доработки позволял выполнить измерения на частоте 10 Гц с точностью 10%. На частотах 20 Гц и выше точность составляла 1...2%. Измерены зависимости  $R$  и  $C$  от времени выдержки в электролите, в качестве которого использовался раствор NaCl с концентрацией 35 г/л  $\pm$  5% (типичная концентрация воды в океане), на протяжении 4000 часов. В течение всего времени проведения эксперимента электролит постоянно обновлялся, вначале ежедневно, затем интервалы между сменами электролита были постепенно увеличены до 7 дней. Все электроды были закреплены на крышке из оргстекла, покрывающей стеклянную ванну с электролитом. Объем ванны составлял 8 литров. Электроды имели цилиндрическую форму. Их боковая поверхность изолирована от электролита нитрокраской, а в качестве рабочей поверхности использовалась торцевая поверхность цилиндров. Диаметр всех электродов, кроме позолоченных составлял 10 мм. Диаметр позолоченных электродов равен 6 мм, для них значения  $R$  и  $C$  пересчитаны к диаметру 10 мм ( $C$  – пропорционально, а  $R$  – обратно пропорционально площади). Электроды располагались на расстоянии 20 мм друг от друга; расстояние между парами электродов из различных материалов составляло 70 ... 100 мм. На рисунках 2.13 и 2.14 представлены зависимости  $R$  и  $C$  в зависимости от времени выдержки в электролите для некоторых материалов на частоте  $f = 90$  Гц.

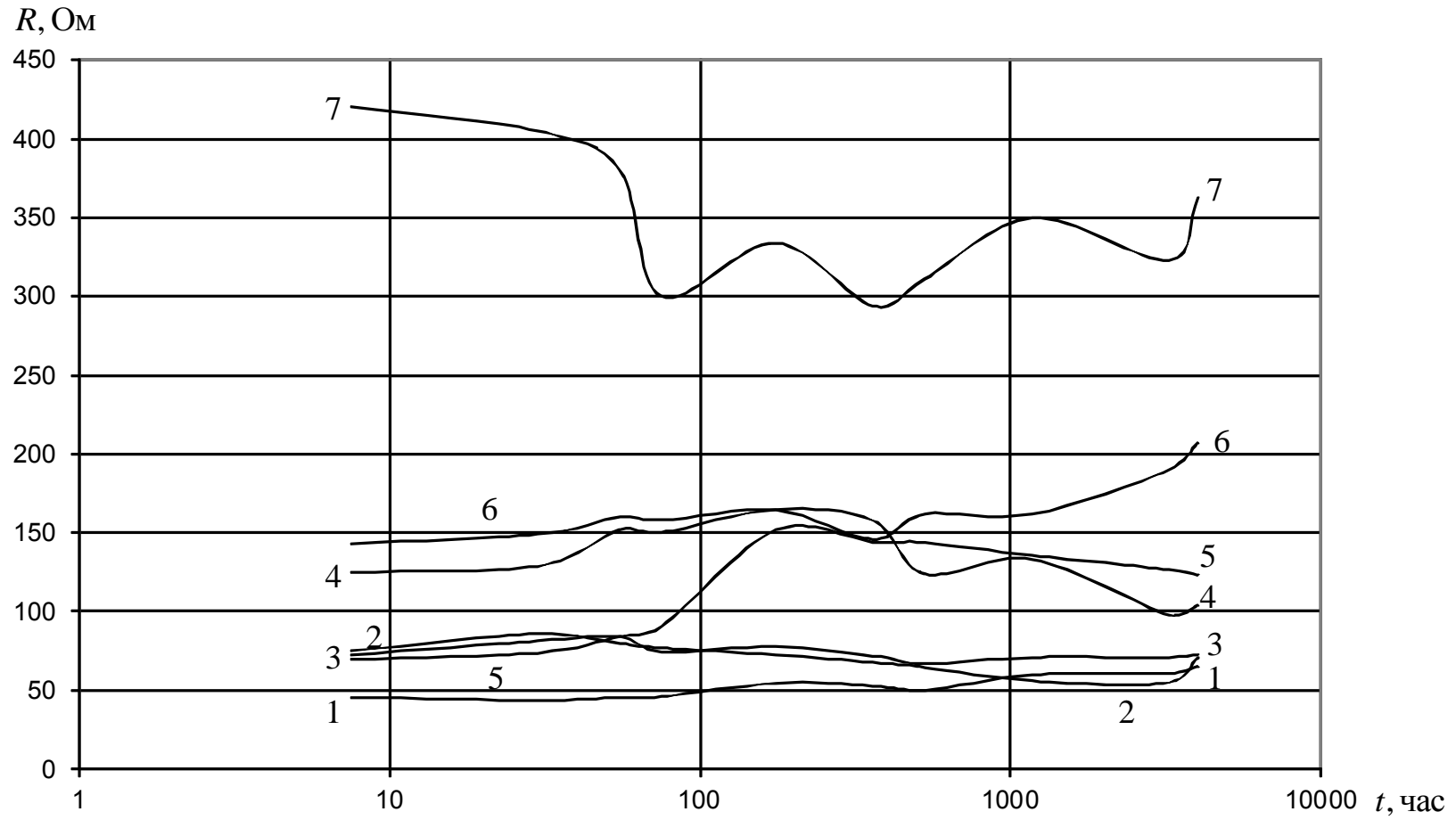


Рисунок 2.13 - Зависимость активной составляющей импеданса электродного датчика от времени выдержки в электролите для разных материалов на частоте 90 Гц. 1- ниобий НБП-1, 2- никель, 3 – тантал, 4 – титан ВТ-10, 5 - золото (покр.), 6 – сталь нерж.1Х18Н9Т, 7 – хром (покр.)



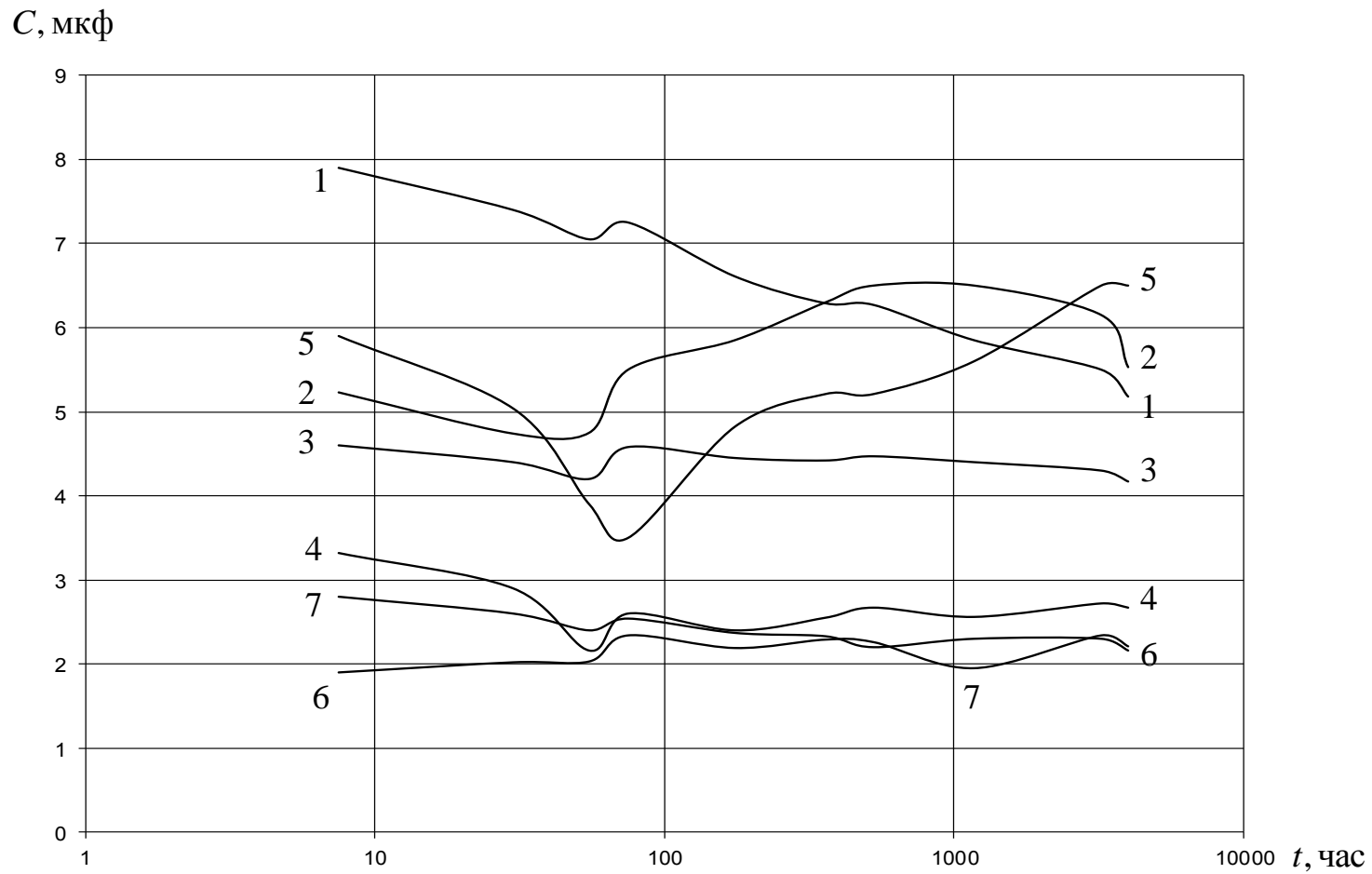


Рисунок 2.14 - Зависимость емкостной составляющей импеданса электродного датчика от времени выдержки в электролите для разных материалов на частоте 90 Гц. 1- ниобий НБП-1, 2- никель, 3 – тантал, 4 – титан ВТ-10, 5 - золото (покр.), 6 – сталь нерж.1X18H9T, 7 – хром (покр.)

Наиболее стабильные во времени значения  $R$  и  $C$  имеют тантал, титан, сталь нержавеющая. Несколько хуже стабильность  $R$  и  $C$  у хрома, никеля, ниобия, золота. На графиках заметны коррелированные между собой скачки значений  $R$  и  $C$  у разных материалов (при  $t = 75$  и  $4000$  часов), вызванные, по-видимому, колебаниями состава электролита, так как измерения производились через неодинаковые промежутки времени после очередной его замены. В частности, увеличение концентрации соли при испарении воды ведет к уменьшению сопротивления и увеличению емкости. Уменьшение концентрации растворенного кислорода, влияющего на параметры двойного электрического слоя, приводит к обратному эффекту. Однако для исследованных материалов скачки значений  $R$  и  $C$  не превышают 10%, то есть находятся в пределах точности измерений. После 300 часов выдержки у большинства указанных материалов значения параметров импеданса стабилизируются. Иная картина наблюдается для меди, латуни, бронзы, а также покрытий из кадмия, цинка, никеля (на рисунке не показаны). Покрытие из цинка разрушилось через 80 часов выдержки полностью. На покрытии из кадмия уже через 80 часов появились пятна темного цвета, через 240 часов вся поверхность стала грязно-серой с черными пятнами. После 816 часов выдержки локальные повреждения появились и на поверхности никелевого покрытия. Зависимости  $R$  и  $C$  от времени для меди и медных сплавов отличаются ярко выраженной нестабильностью, большим некоррелированным разбросом значений, достигающим более 100%. Активное сопротивление у меди и бронзы, начиная с 300 и 500 часов соответственно, начало возрастать и достигло к концу эксперимента единиц тысяч Ом, что на порядок больше, чем у таких материалов, как тантал, ниобий, никель. Активное сопротивление у латунных электродов имело максимум при  $t = 200 \dots 500$  часов, достигающий более 2 кОм. К концу эксперимента наблюдался резкий спад емкости электродов из меди и бронзы от значений, превышающих 50 мкФ до единиц мкФ. Состояние рабочей поверхности электродов из тантала, ниобия, титана, и золота близкое к первоначальному. Поверхность электродов из бронзы КМЦ потемнела равномерно, без пятен и в таком состоянии находилась с  $t = 80$  часов без видимых изменений. Медные электроды покрылись

толстым рыхлым, осыпающимся слоем окисла. Поверхность латунных электродов грязно-желтого цвета.

На рисунках 2.15-2.18 представлены частотные зависимости  $R$  и  $C$  для разных материалов на момент окончания эксперимента ( $t = 4000$  часов). Активное сопротивление пропорционально  $f^{-\alpha}$ , где  $\alpha = 0,7 \dots 0,8$  для всех перечисленных на рис.2.8 и 2.9 металлов, кроме никеля, для которого  $\alpha = 1$ . Зависимость емкости  $C$  от частоты значительно меньше,  $\alpha = 0,1 \dots 0,15$  для тех же металлов, кроме золота и хрома, для которых  $\alpha = 0,25$ . Однако для меди, латуни и бронзы (на рисунках не показаны) изменение емкости в диапазоне  $10 \dots 0000$  Гц составляло  $50 \dots 200$  раз, в то время как для остальных материалов не более 3 раз. Активное сопротивление у меди, бронзы и латуни более постоянно в указанном диапазоне частот, чем у остальных материалов, однако по абсолютной величине больше, особенно на частотах выше 50 Гц. Так на частоте  $f = 90$  Гц активное сопротивление лучшего по этому параметру из медных сплавов - латуни - больше, чем у тантала, никеля, ниобия примерно на порядок. Во всех случаях вклад сопротивления растекания в измеренное сопротивление составляет около 15 Ом. С точки зрения стабильности составляющих импеданса и низкого значения его активной составляющей наиболее пригодными материалами из исследованных для работы в морской воде, следует считать тантал, ниобий, никель, титан, золото, сталь нержавеющей. Позолоченные электроды имеют повышенную по сравнению с другими материалами величину емкости. По - видимому, это обусловлено отсутствием на их поверхности окисной пленки. Однако наш опыт показал, что все покрытия имеют поры и с течением времени разрушаются, поэтому их применения следует избегать. Нужно отметить, что выводы о применимости различных материалов для изготовления электродов датчиков не совпадают с рекомендациями [12], где в числе лучших материалов названы бронза БрАЖ, кадмий или его покрытие. По результатам нашего исследования эти материалы являются одними из худших.

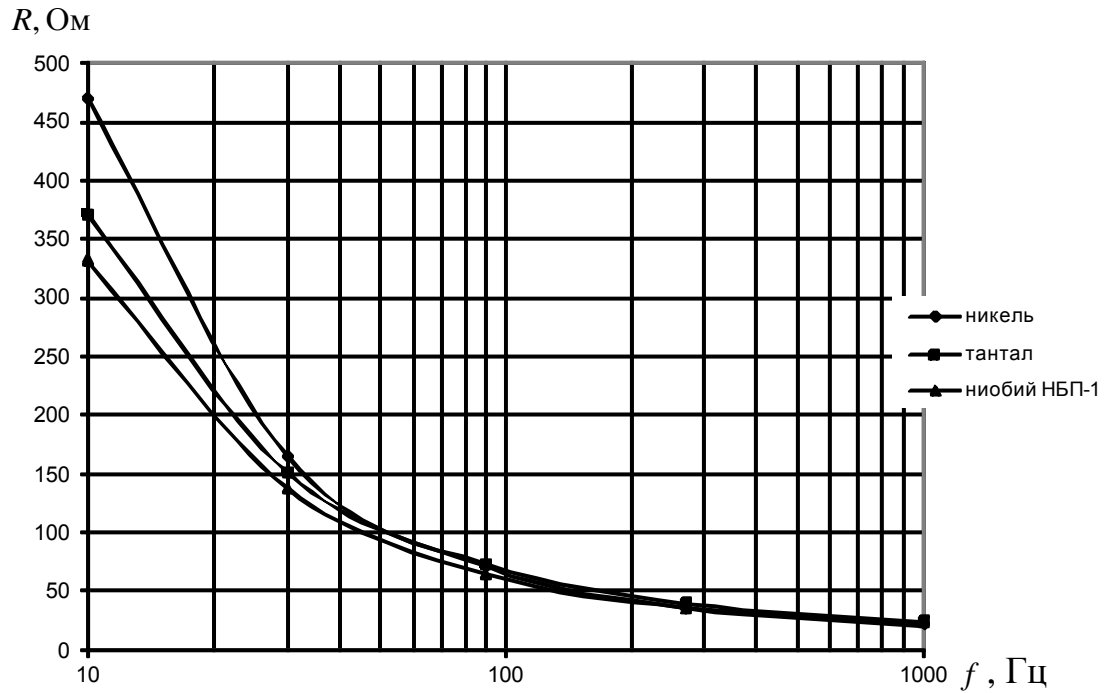


Рисунок 2.15 - Зависимость активной составляющей импеданса электродного датчика от частоты для разных материалов после выдержки в электролите в течение 4000 часов

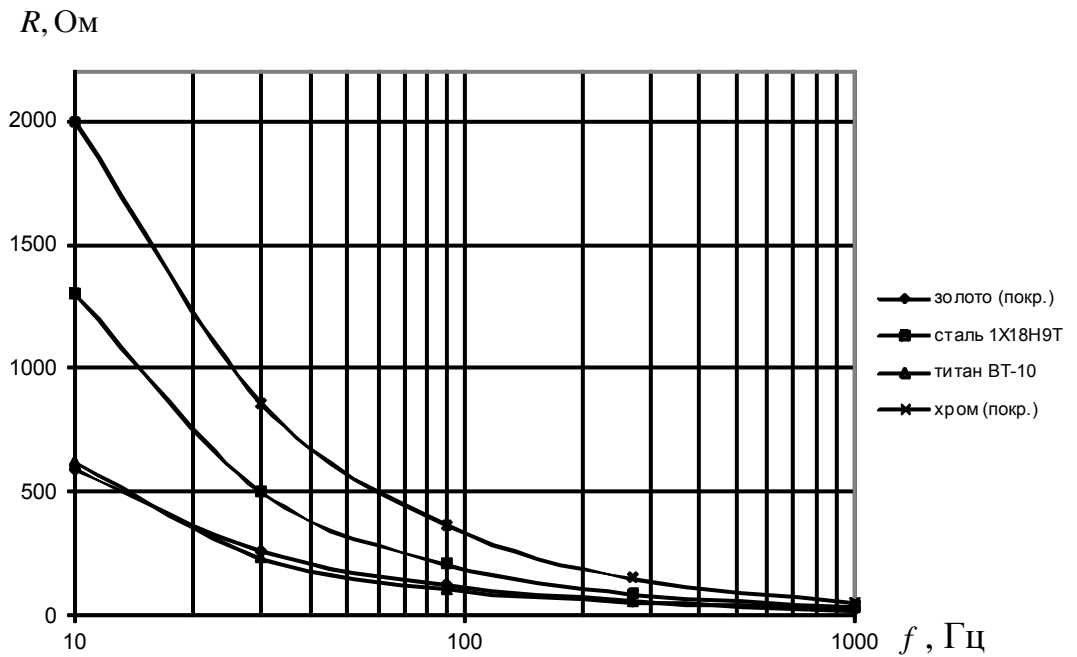


Рисунок 2.16 - Зависимость активной составляющей импеданса электродного датчика от частоты для разных материалов после выдержки в электролите в течение 4000 часов

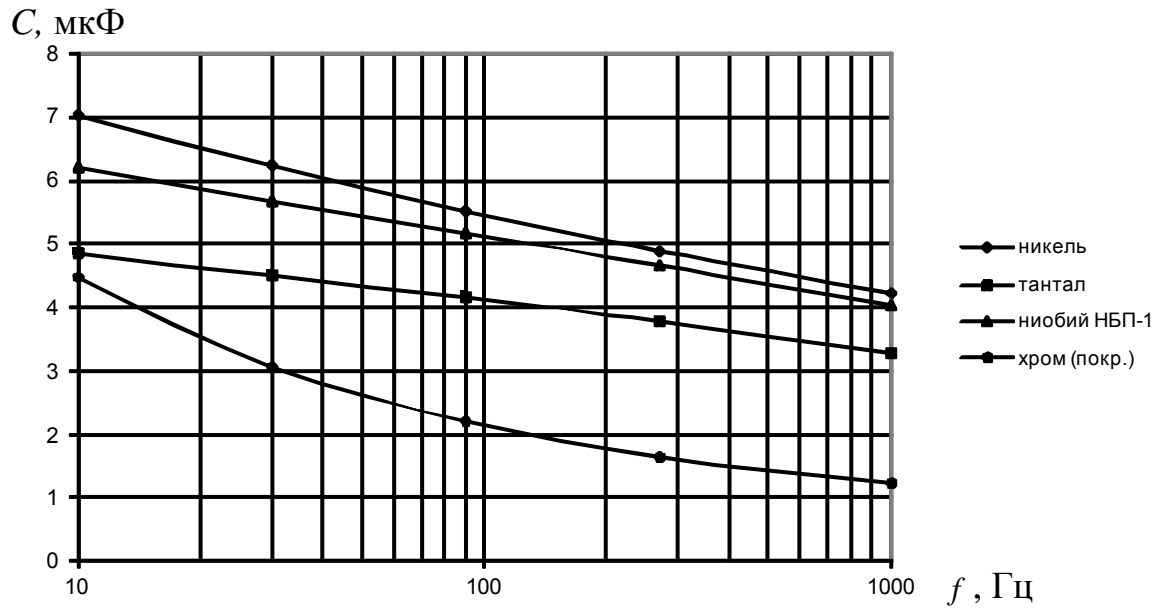


Рисунок 2.17 - Зависимость реактивной составляющей импеданса электродного датчика от частоты для разных материалов после выдержки в электролите в течение 4000 часов

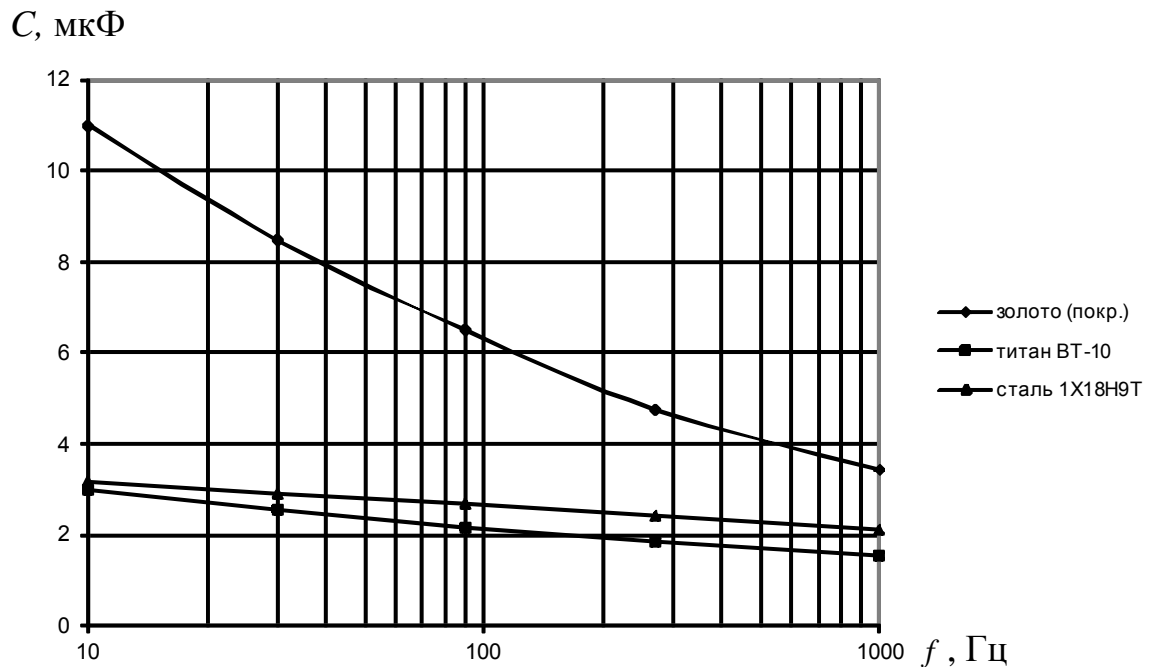


Рисунок 2.18 - Зависимость реактивной составляющей импеданса электродного датчика от частоты для разных материалов после выдержки в электролите в течение 4000 часов

Импедансные характеристики электродных ячеек, составленных из двух одинаковых электродов с площадью рабочей поверхности  $0,78 \text{ см}^2$ , выполненных из материалов, пригодных для применения в электродных датчиках, приведены в таблице 2.1, составленной по измерениям, описанным выше. Из измеренного сопротивления  $R$  электродной ячейки вычтено сопротивление растекания  $r$ , в результате получено значение контактного сопротивления электродов  $r_{эл}$ . Поскольку сопротивление  $r_{эл}$  обратно пропорционально, а емкость  $C$  - прямо пропорциональна площади электрода, то постоянная времени  $\tau_{эл} = r_{эл} C$  практически не зависит от площади электродов и является характеристикой материала. Оказалось, что она также практически не зависит от частоты. Сопротивление  $r_{эл}$  представляет собой минимальное значение сопротивления датчика, а  $\tau_{эл}$  - минимальное значение постоянной времени датчика  $\tau = RC$ . Поэтому, используя данные таблицы 2.1, можно провести сравнение материалов по достигаемой датчиком предельной чувствительности. Реально используемые датчики имеют другие размеры, чем исследованные в эксперименте. Обычно площадь электродов составляет от единиц до сотен квадратных сантиметров, при этом они расположены на расстоянии до нескольких десятков дециметров. Рассчитаем сопротивление и емкость датчика произвольных размеров. Сопротивление растекания для датчика с электродами сферической формы радиусом  $a$ , расположенными на расстоянии  $d \gg a$  в среде с удельной проводимостью  $\sigma$  [34] (Смайт),

$$r \approx 1/2\pi\sigma a. \quad (2.5)$$

Учитывая прямую пропорциональность емкости и обратную пропорциональность контактного сопротивления от площади, в соответствии с таблицей 2.12 сопротивление датчика в этом случае

$$R = r + 0,78 \cdot 10^{-4} r_{эл} / 4\pi a^2, \quad (2.6)$$

емкость датчика

$$C = 4\pi a^2 C_{эл} / 0,78 \cdot 10^{-4}, \quad (2.7)$$

где  $a$  в метрах.

Таблица 2.1. Импедансные характеристики электродных ячеек с площадью электродов  $0,78 \text{ см}^2$

Материал	Параметр	Частота, Гц		
		30	90	270
Никель	$r_{\text{эл}}$ , Ом	150	56	21
	$C$ , мкФ	6,23	5,18	4,9
	$\omega\tau_{\text{эл}}$	0,18	0,16	0,17
Ниобий НБП-1	$r_{\text{эл}}$ , Ом	123	50	21
	$C$ , мкФ	5,68	5,18	4,67
	$\omega\tau_{\text{эл}}$	0,13	0,15	0,17
Сталь X18Н9Т	$r_{\text{эл}}$ , Ом	483	192	70,4
	$C$ , мкФ	2,54	2,16	1,83
	$\omega\tau_{\text{эл}}$	0,23	0,23	0,22
Титан ВТ-10	$r_{\text{эл}}$ , Ом	215	89	37,8
	$C$ , мкФ	2,9	2,67	2,43
	$\omega\tau_{\text{эл}}$	0,12	0,13	0,16
Тантал	$r_{\text{эл}}$ , Ом	136	58	25
	$C$ , мкФ	4,5	4,17	3,79
	$\omega\tau_{\text{эл}}$	0,12	0,14	0,16
Золото (покрытие)	$r_{\text{эл}}$ , Ом	250	120	49
	$C$ , мкФ	8,48	6,5	4,76
	$\omega\tau_{\text{эл}}$	0,4	0,44	0,4

В таблицах 2.2-2.7 приведены импедансные характеристики датчика с электро-

дами из разных металлов, рассчитанные по формулам (2.6) и (2.7) по данным таблицы 2.1. Датчик имеет два сферических электрода радиусом  $a$ , расположенных на расстоянии  $l \gg a$  в морской воде с  $\sigma = 4 \text{ См/м}$ .

Таблица 2.2. Импедансные характеристики датчика с электродами из никеля

Радиус $a$ , см	Параметр	Частота, Гц		
		30	90	270
1	$R$ , Ом	13,3	7,5	5,3
	$C$ , мкф	100,3	89	78,9
	$\omega\tau$	0,17	0,38	0,71
5	$R$ , Ом	1,17	0,94	0,85
	$C$ , мкФ	2510	2225	1970
	$\omega\tau$	0,25	1,18	2,84

Таблица 2.3. Импедансные характеристики датчика с электродами из ниобия

Радиус $a$ , см	Параметр	Частота, Гц		
		30	90	270
1	$R$ , Ом	11,64	7,1	5,3
	$C$ , мкф	91,5	83,4	75,2
	$\omega\tau$	0,2	0,33	0,68
5	$R$ , Ом	1,1	0,92	0,85
	$C$ , мкФ	2290	2085	1880
	$\omega\tau$	0,47	1,1	2,7



Таблица 2.4. Импедансные характеристики датчика с электродами из нержавеющей стали X18H9T

Радиус $a$ , см	Параметр	Частота, Гц		
		30	90	270
1	$R$ , Ом	32,1	15,9	8,4
	$C$ , мкф	40,9	34,8	29,5
	$\omega\tau$	0,25	0,29	0,42
5	$R$ , Ом	1,93	1,28	0,97
	$C$ , мкФ	1020	870	737
	$\omega\tau$	0,37	0,89	1,21

Таблица 2.5. Импедансные характеристики датчика с электродами из титана

Радиус $a$ , см	Параметр	Частота, Гц		
		30	90	270
1	$R$ , Ом	17,35	9,53	6,35
	$C$ , мкФ	46,7	43	39
	$\omega\tau$	0,15	0,23	0,42
5	$R$ , Ом	1,33	1,02	0,89
	$C$ , мкФ	1170	1075	980
	$\omega\tau$	0,29	0,62	1,48

Таблица 2.6. Импедансные характеристики датчика с электродами из тантала

Радиус $a$ , см	Параметр	Частота, Гц		
		30	90	270
1	$R$ , Ом	12,45	7,6	5,55
	$C$ , мкф	72,5	67,1	61
	$\omega\tau$	0,17	0,29	0,57
5	$R$ , Ом	1,14	0,94	0,86
	$C$ , мкФ	1810	1680	1525
	$\omega\tau$	0,39	0,89	2,22

Таблица 2.7. Импедансные характеристики датчика с позолоченными электродами

Радиус $a$ , см	Параметр	Частота, Гц		
		30	90	270
1	$R$ , Ом	19,5	11,5	7,05
	$C$ , мкф	137	105	77
	$\omega\tau$	0,5	0,68	0,92
5	$R$ , Ом	1,42	1,1	0,92
	$C$ , мкФ	3410	2620	1920
	$\omega\tau$	0,91	1,63	2,99

### 2.3. Влияние нефтепродуктов на импеданс электродов

Известно, что море, особенно акватория порта, часто загрязнено нефтепродуктами. Для исследования влияния нефтепродуктов на параметры электродного датчика электромагнитного поля использованы танталовые электроды, выдержанные в электролите более 5000 часов. В качестве нефтепродукта использовалось дизельное топливо (солярка). Перед нанесением нефтепродукта составляющие импеданса электродов измерены таким же образом, что и в разделе 2.2. Результаты измерения сведены в таблицу 2.8.

Таблица 2.8. Составляющие импеданса электродной ячейки перед нанесением нефтепродукта

$f$ , Гц	20	90	270	1000
$R$ , Ом	192	71	40	25,4
$C$ , МкФ	4,73	4,32	3,9	3,4

На смоченную электролитом поверхность электродов был нанесен нефтепродукт, затем электроды снова погружены в электролит и измерены составляющие импеданса. Результаты измерения занесены в таблицу 2.9. Изменения  $R$  и  $C$  оказались очень небольшими. Это объясняется тем, что прослойка электролита не дала возможности нефтепродукту воздействовать непосредственно на поверхность электрода. После выдерживания электродов с нанесенным нефтепродуктом в течение 2,5 суток в электролите значения  $R$  и  $C$  несколько изменились (таблица 2.10). Однако наибольшее воздействие нефтепродукта наблюдалось в том случае, когда электроды были вынуты из электролита, просушены и лишь после этого покрыты нефтепродуктом. После 1 часа выдержки их на воздухе электроды помещены в электролит и через 1,5 часа произведены измерения составляющих импеданса (таблица 2.11), которые показали, что наблюдается заметное уменьшение емкости (в 3 раза) и увеличение сопротивления электродов. Это можно объ-

яснить тем, что нефтепродукт образует на поверхности электрода слой с низкой электропроводностью. Значительное увеличение  $R$  приводит к росту тепловых шумов электродов, относительный вклад которых увеличивается в области высоких частот (около 1 кГц).

Таблица 2.9. Составляющие импеданса электродной ячейки через 1,5 часа после нанесения нефтепродукта на смоченную поверхность электродов

$f$ , Гц	20	90	270	1000
$R$ , Ом	193	73	40	26
$C$ , МкФ	4,72	4,27	3,9	3,34

Таблица 2.10. Составляющие импеданса электродной ячейки через 2,5 суток после нанесения нефтепродукта на смоченную поверхность электродов

$f$ , Гц	20	90	270	1000
$R$ , Ом	255	92,5	49,6	29,2
$C$ , МкФ	4,27	3,75	3,34	2,83

Таблица 2.11. Составляющие импеданса электродной ячейки через 1,5 часа после нанесения нефтепродукта на сухую поверхность электродов

$f$ , Гц	20	90	270	1000
$R$ , Ом	800	272	135	68,2
$C$ , МкФ	1,75	1,48	1,28	1,04

Если учесть, что сопротивление растекания составляло около 15 Ом, то воздействие нефтепродукта увеличило сопротивление самих электродов в 5 раз, а уровень теплового шума в 2,24 раза. Кроме того, это приводит к рассогласованию датчика с предварительным усилителем, что приводит к увеличению коэффициента шума усилителя. Таким образом, для уменьшения влияния нефтепродуктов

на параметры электродных датчиков необходимо не допускать высыхания электродов, они должны все время находиться в электролите.

#### ***2.4. Согласование электродного датчика с приемным устройством с помощью трансформатора***

Как показано выше, эквивалентную электрическую схему электродного датчика можно представить последовательным соединением активного сопротивления и емкости, причем каждый из элементов эквивалентной схемы зависит от частоты. Согласно [7; 12] (Бернштейн, Кочанов) простейший электродный датчик, представляющий собой два электрода, разнесенные на расстояние, много большее их размеров, можно заменить источником ЭДС  $e_c$  и последовательно с ним включенными активным сопротивлением  $R$  и емкостью  $C$ . При этом

$$e_c = Ed, \quad (2.8)$$

где  $E$  - напряженность электрического поля,  $d$  - действующая длина датчика, которая для рассматриваемого простейшего датчика равна геометрическому расстоянию между электродами по направлению вектора  $\vec{E}$ . У более сложных по конструкции электродных датчиков действующая длина определяется сложными формулами [12] (Кочанов). Поскольку электродный датчик имеет, как правило, значение сопротивления  $R$  порядка 1...10 Ом и емкость  $C$  порядка 100...1000 мкФ, то для согласования его с предварительным усилителем обычно применяют трансформатор, коэффициент трансформации которого  $n$  выбирается из условия получения максимального отношения сигнал/шум на выходе усилителя. Собственный шум приемного устройства с электродным датчиком складывается из теплового шума активного сопротивления  $R$  датчика, шума предварительного усилителя и шума согласующего трансформатора. Как показано в разделе 2.1, электродные датчики кроме теплового шума в общем случае обладают также шумом электрохимического происхождения. Однако, как показали наши исследования, у ряда некорродирующих металлов (например, у тантала, титана, ниобия, ни-

келя, нержавеющей стали X18H9Т) эта составляющая шума существенна лишь на частотах ниже 30 Гц. Поэтому в этом разделе мы не будем ее учитывать, полагая, что для выбранного материала в рабочем диапазоне частот электрохимический шум мал по сравнению с тепловым.

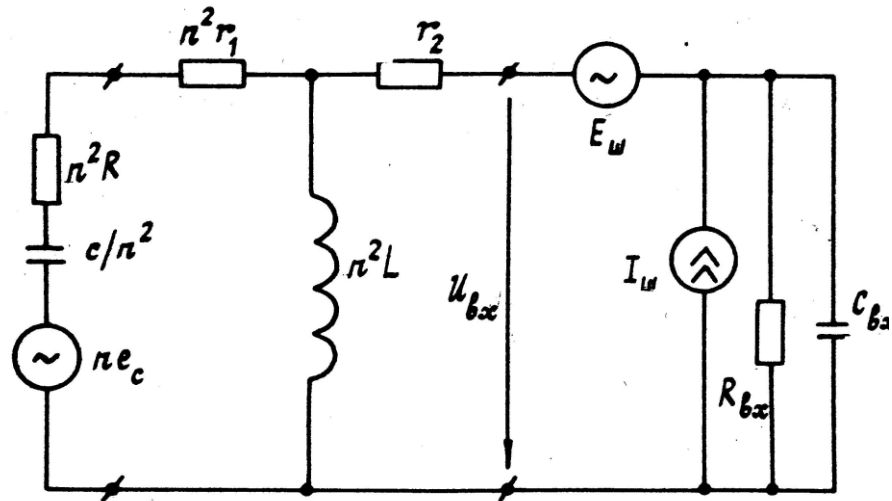


Рисунок 2.19 - Эквивалентная схема входной цепи приемного устройства

Представляет практический интерес выработка рекомендаций по согласованию электродного датчика с предварительным усилителем и выбору материала для электродов с целью достижения наивысшей чувствительности приемного устройства. Эквивалентная схема входной цепи приемного устройства приведена на рисунке 2.19. Предварительный усилитель представлен в виде нешумящего двухполюсника с входным сопротивлением  $R_{bx}$  и входной емкостью

$C_{bx}$ , к входу которого подключены вынесенные из усилителя шумовые источники  $E_w$  и  $I_w$ . Трансформатор представлен сопротивлением первичной  $r_1$  и вторичной  $r_2$  обмоток и индуктивностью  $L$  первичной обмотки. Все элементы пересчитаны к входу предварительного усилителя через коэффициент трансформации  $n$ . Учитывая, что при конструировании трансформатора исходят из требования получения минимального коэффициента шума  $F_{tr}$ , сопротивление первичной обмотки  $r_1$  выбирают из условия  $r_1 \ll R$ , а сопротивление вторичной обмотки  $r_2$  - из

условия  $r_2 = n^2 r_1$  [70] (Кузнецов).

$$F_{\text{тр}} = 1 + \frac{r_1}{R} + \frac{r_2}{n^2 R} = 1 + \frac{2r_1}{R}. \quad (2.9)$$

Будем считать, что в рабочем диапазоне частот выполняются следующие соотношения:  $n \gg 1$ ,  $r_2 \ll R_{\text{вх}}$ ,  $1/\omega C_{\text{вх}} \gg R_{\text{вх}}$ ,  $C/n^2 \gg C_{\text{вх}}$ . В соответствии с эквивалентной схемой (рисунок 2.12) напряжение на входе усилителя

$$U_{\text{вх}} \approx \frac{ne_c \omega L}{\sqrt{\left(\omega L \left(1 + \frac{n^2(R+r_1)}{R_{\text{вх}}}\right) - \frac{1}{\omega C}\right)^2 + (R+r_1)^2 \left(1 + \frac{n^2 L}{C(R+r_1)R_{\text{вх}}}\right)^2}}. \quad (2.10)$$

При трансформаторном согласовании усилителя с источником сигнала, имеющим чисто активное внутреннее сопротивление  $R_i$ , минимальный коэффициент шума достигается при  $n^2 R_i = R_{i\text{опт}}$ , где  $R_{i\text{опт}} = E_{\text{ш}} / I_{\text{ш}}$ . Добротность реактивности датчика  $Q_{\text{дпн}} = 1/\omega\tau$  не превышает нескольких единиц, поэтому следует ожидать, что величина  $n^2 R$  будет того же порядка, что и  $R_{i\text{опт}}$ . На практике для малошумящих усилителей всегда выполняется соотношение  $R_{i\text{опт}} \ll R_{\text{вх}}$ , следовательно выполняется и соотношение  $n^2(R+r_1) \ll R_{\text{вх}}$ . В случае резонансного согласования  $\omega_0 L = 1/\omega_0 C$  и значение  $U_{\text{вх}}$  достигает максимума. В реальных датчиках величина  $\omega\tau$  обычно порядка единицы или больше, поэтому

$$\frac{n^2 L}{C(R+r_1)R_{\text{вх}}} \approx \frac{n^2 R}{\omega_0^2 \tau^2 R_{\text{вх}}} \ll 1.$$

Тогда

$$U_{\text{вх}} \approx \frac{ne_c}{\omega_0 C(R+r_1)} = \frac{ne_c}{\omega_0 \tau} \frac{R}{R+r_1} = \frac{ne_c}{\omega_0 \tau} \frac{2}{F_{\text{тр}} + 1}. \quad (2.11)$$

Со стороны усилителя полное сопротивление входной цепи в соответствии с рис.2.19 на частоте  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$

$$Z = \frac{n^2 R}{\omega_0^2 \tau^2} \left( \frac{R}{R+r_1} + \frac{r_2}{n^2 R} \omega_0^2 \tau^2 + j\omega_0 \tau \right) = \frac{n^2 R}{\omega_0^2 \tau^2} (A + j\omega_0 \tau), \quad (2.12)$$

где

$$A = \frac{2}{F_{\text{тр}} + 1} + \frac{F_{\text{тр}} - 1}{2} \omega_0^2 \tau^2.$$

Таким образом, на частоте  $\omega_0$  сопротивление входной цепи имеет комплексный характер. При этом вещественная его часть определяет тепловой шум входной цепи, а модуль сопротивления влияет на величину шума усилителя. В соответствии с (2.12) и эквивалентной схемой (рисунок 2.12) отношение сигнал/шум на входе усилителя в полосе 1 Гц на частоте  $\omega_0$  запишется в виде:

$$\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = \frac{(n e_c)^2}{(\omega_0 \tau)^2 \left( \frac{F_{\text{тр}} + 1}{2} \right)^2 \left( 4kT \frac{n^2 R}{\omega_0^2 \tau^2} A + E_{\text{ш}}^2 + I_{\text{ш}}^2 \frac{n^4 R^2}{\omega_0^4 \tau^4} (A^2 + \omega_0^2 \tau^2) \right)}, \quad (2.13)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура. Выражение (2.14) достигает максимума

$$\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = \frac{e_c^2}{4kTR \left( \frac{F_{\text{тр}} + 1}{2} \right)^2 \left[ A + (F_{\text{усмин}} - 1) \sqrt{A^2 + \omega_0^2 \tau^2} \right]} \quad (2.14)$$

при

$$n_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{R_{i\text{опт}}}{R}} \frac{\omega_0 \tau}{\sqrt[4]{A^2 + \omega_0^2 \tau^2}}, \quad (2.15)$$

где  $F_{\text{усмин}} = 1 + E_{\text{ш}} I_{\text{ш}} / 2kT$  - минимальный коэффициент шума усилителя (при активном сопротивлении источника сигнала  $R_i = R_{i\text{опт}}$ ). Отсюда получаем выражение для предельной чувствительности по напряженности электрического поля приемника с электродным датчиком ( $P_c / P_{\text{ш}} = 1$ ) в полосе 1 Гц

$$E_{\text{мин}} = \frac{1}{d} \sqrt{4kTR} \left( \frac{F_{\text{тр}} + 1}{2} \right) \sqrt{A + (F_{\text{усмин}} - 1) \sqrt{A^2 + \omega_0^2 \tau^2}}. \quad (2.16)$$

Резонансное согласование реализуется в довольно узкой полосе частот вблизи фиксированной частоты  $f_0$ , которую можно оценить, как  $\Delta F = f_0 / Q = 2\pi f_0^2 CR$ . Если необходимо работать в более широком диапазоне частот с постоянным коэффициентом передачи, то частоту резонанса  $\omega_0$  путем выбора индуктивности  $L$



следует располагать много ниже рабочего диапазона частот (если  $\omega_0$  выше рабочего диапазона, то коэффициент передачи меньше резонансного и зависит от частоты). В этом случае  $\omega L \gg 1/\omega C$ ,  $\omega L \gg R$ . На частотах выше 100 Гц при диаметре электродов порядка 10 см  $\omega\tau > 1$  при резонансе напряжение на входе усилителя становится меньше, чем  $ne_c$ . При работе на частоте  $\omega \gg \omega_0$  влиянием реактивностей в схеме на рисунке 2.12 можно пренебречь, поэтому при  $n^2(R+r_1) + r_2 \ll R_{\text{вх}}$  напряжение на входе усилителя  $U_{\text{вх}} \approx ne_c$ . Полное сопротивление входной цепи со стороны усилителя при  $\omega \gg \omega_0$

$$Z \approx n^2 R \left( 1 + \frac{r_1}{R} + \frac{r_2}{n^2 R} - j \frac{1}{\omega\tau} \right) = n^2 R \left( F_{\text{тр}} - j \frac{1}{\omega\tau} \right). \quad (2.17)$$

При нерезонансном согласовании в соответствии с рисунком 2.11 отношение сигнал/шум на входе усилителя в полосе 1 Гц на частоте  $\omega$  запишется в виде:

$$\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = \frac{(ne_c)^2}{4kTRn^2F_{\text{тр}} + E_{\text{ш}}^2 + I_{\text{ш}}^2 n^4 R^2 \left( F_{\text{тр}}^2 + \frac{1}{\omega^2 \tau^2} \right)} \quad (2.18)$$

Это выражение достигает максимума

$$\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = \frac{e_c^2}{4kTR \left( F_{\text{тр}} + (F_{\text{усмин}} - 1) \sqrt{F_{\text{тр}}^2 + \frac{1}{\omega^2 \tau^2}} \right)} \quad (2.19)$$

при

$$n_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{R_{i\text{опт}}}{R}} \frac{1}{\sqrt[4]{F_{\text{тр}}^2 + \frac{1}{\omega^2 \tau^2}}}. \quad (2.20)$$

Из (2.20) следует формула, определяющая предельную чувствительность приемника с электродным датчиком по напряженности электрического поля при нерезонансном согласовании

$$E_{\text{мин}} = \frac{1}{d} \sqrt{4kTR \left[ F_{\text{тр}} + (F_{\text{усмин}} - 1) \sqrt{F_{\text{тр}}^2 + \frac{1}{\omega^2 \tau^2}} \right]}. \quad (2.21)$$

## 2.5. Оптимизация входного трансформатора

Выше рассмотрены варианты построения входной цепи приемного устройства с использованием трансформатора. Индуктивность первичной обмотки у трансформатора, работающего в широкой полосе частот, считалась большой и ее влиянием на частотную характеристику мы пренебрегали. В общем случае это не так, и уменьшение коэффициента передачи за счет шунтирующего действия индуктивности первичной обмотки принято оценивать коэффициентом частотных искажений  $M = \sqrt{1 + (R / 2\pi f L_1)^2}$ , который показывает во сколько раз коэффициент передачи на данной частоте меньше, чем его максимальное значение, достигаемое вдали от нижней границы частотного диапазона. Здесь  $R$  - активная часть импеданса электродного датчика,  $f$  - рабочая частота,  $L_1$  - индуктивность первичной обмотки. При работе в широком диапазоне частот на большей части диапазона  $M \approx 1$ . Это условие не выполняется только на нижних частотах диапазона. При работе на фиксированной частоте или в узком диапазоне частот применение нерезонансного согласования может быть оправдано только в случае большой нестационарности емкости датчика, которая приводит к изменению частоты настройки входной цепи (например, за счет загрязнения поверхности электродов нефтепродуктами). В таком случае трансформатор является широкополосным, рабочая частота находится далеко от нижней границы диапазона  $f_n$ , поэтому на этой частоте  $M \approx 1$ . Резонансный трансформатор позволяет получить более низкое значение коэффициента шума трансформатора  $F_{TP}$

$$F_{TP} = 1 + \frac{r_{\Sigma}}{R}, \quad (2.22)$$

где  $r_{\Sigma} = r_1 + r_2 / n^2$ ,  $r_1$  и  $r_2$  - активные сопротивления провода соответственно первичной и вторичной обмотки. Это достигается меньшей величиной индуктивности первичной обмотки  $L_1$ , которая выбирается из условия получения резонанса на рабочей частоте с емкостью электродного датчика, следовательно и меньшим

сопротивлением обмоток. В общем случае для нерезонансного трансформатора при  $M > 1$  имеем [70] (Кузнецов)

$$F_{TP} = 1 + \frac{r_1 + r_2 / n^2 M^2}{R}. \quad (2.23)$$

Рассматриваемый трансформатор предназначен для работы в диапазоне низких частот (единицы - сотни герц), поэтому можно пренебречь влиянием эффекта близости и поверхностного эффекта на сопротивление обмоток. Для уменьшения восприимчивости к внешним магнитным полям во входном трансформаторе целесообразно применять тороидальный или броневой ферритовый сердечник.

*а). Броневой сердечник*

В этом случае катушка имеет цилиндрическую форму с внутренним диаметром  $D_1$ , внешним диаметром  $D_2$  и высотой  $H$  (рисунок 2.20).

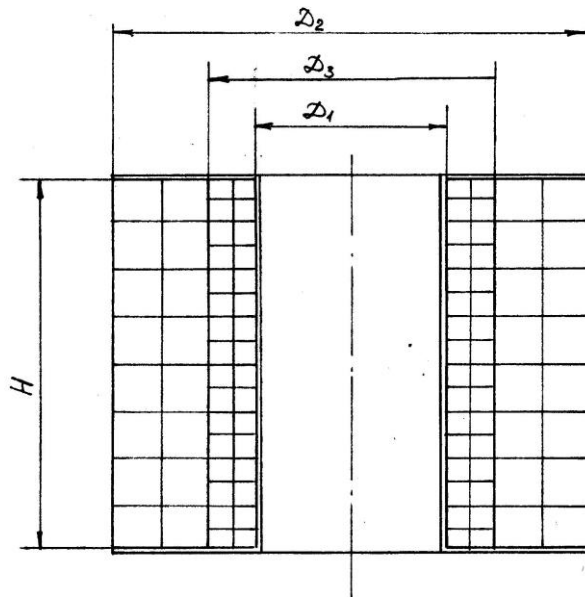


Рисунок 2.20 - Схема расположения обмоток трансформатора с броневым сердечником

Цилиндрическая форма катушки, обладая наименьшим отношением длины витка к площади его сечения, обеспечивает также минимальное сопротивление обмоток трансформатора. Обозначим через  $D_3$  диаметр поверхности раздела между первичной и вторичной обмотками. Для конкретности предположим, что внутренняя обмотка является первичной. Ее сопротивление

$$r_1 = 2W_1\rho(D_1 + D_3)/d_1^2, \quad (2.24)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление материала провода,  $d_1$  - диаметр провода первичной обмотки,  $W_1$  - число витков в первичной обмотке. Аналогично сопротивление вторичной обмотки

$$r_2 = 2W_2\rho(D_2 + D_3)/d_2^2. \quad (2.25)$$

Обозначим число витков в одном слое первичной обмотки через  $W_{1c}$

$$W_{1c} = \frac{H}{d_1}k_H, \quad (2.26)$$

где  $k_H$  - коэффициент неплотности намотки. Число слоев в первичной обмотке

$$N_1 = \frac{D_3 - D_1}{2d_1}k_3, \quad (2.27)$$

где  $k_3$  - коэффициент заполнения.

Учитывая, что  $N_1 = W_1/W_{1c}$ , из (2.26) и (2.27) получаем диаметр провода первичной обмотки

$$d_1 = \sqrt{\frac{D_3 - D_1}{2W_1}k_Hk_3H}. \quad (2.28)$$

Аналогично диаметр провода вторичной обмотки

$$d_2 = \sqrt{\frac{D_2 - D_3}{2W_2}k_Hk_3H}. \quad (2.29)$$

Учитывая, что  $W_2 = nW_1$ , приведенное ко входу трансформатора сопротивление двух обмоток в общем случае при  $M > 1$

$$r_\Sigma = r_1 + r_2/n^2M^2 = \frac{4W_1^2\rho}{Hk_Hk_3} \left( \frac{D_1 + D_3}{D_3 - D_1} + \frac{1}{M^2} \frac{D_2 + D_3}{D_2 - D_3} \right). \quad (2.30)$$

Выбор  $D_3$  по минимуму  $r_\Sigma$  дает значение

$$D_3 = \frac{D_1D_2(1 - M^2) + M(D_2 - D_1)\sqrt{D_1D_2}}{D_2 - M^2D_1}. \quad (2.31)$$

При нерезонансном согласовании число витков первичной обмотки  $W_1$  определяется из условия получения заданных частотных искажений  $M_H$  [70] (Кузнецов) на нижней частоте диапазона  $f_H$

$$W_1^2 \approx R / a 2\pi f_H \sqrt{M_H^2 - 1}, \quad (2.32)$$

где  $a = L_1 / W_1^2$  - коэффициент, экспериментально определяемый для выбранного сердечника, то минимальное значение приведенного сопротивления  $r_\Sigma$

$$r_{\Sigma \min} = \frac{2R\rho}{Hk_H k_3 a \pi f_H} \frac{1}{M^2 \sqrt{M_H^2 - 1}} \left[ \frac{\frac{1}{A} + 1 + BM - 2M^2}{\frac{1}{A} - 1 - BM} + M \frac{2 + BM - M^2(A+1)}{M(A-1) + B} \right], \quad (2.33)$$

где  $A = D_1 / D_2$ ;  $B = (D_2 - D_1) / \sqrt{D_1 D_2}$ .

При внешнем расположении первичной обмотки

$$r_\Sigma = \frac{4W_1^2 \rho}{Hk_H k_3} \left( \frac{1}{M^2} \frac{D_1 + D_3}{D_3 - D_1} + \frac{D_2 + D_3}{D_2 - D_3} \right). \quad (2.34)$$

Сопротивление  $r_\Sigma$  имеет минимум при

$$D_3 = \frac{D_1 D_2 (M^2 - 1) + M (D_2 - D_1) \sqrt{D_1 D_2}}{M^2 D_2 - D_1}, \quad (2.35)$$

равный

$$r_{\Sigma \min} = \frac{2R\rho}{Hk_H k_3 a \pi f_H} \frac{1}{M^2 \sqrt{M_H^2 - 1}} \left[ \frac{BM + 2M^2 - A - 1}{A - 1 + BM} + M \frac{BM + M^2 \left( \frac{1}{A} + 1 \right) - 2}{M \left( \frac{1}{A} - 1 \right) - B} \right] \quad (2.36)$$

В общем виде можно записать

$$r_{\Sigma \min} = \frac{2R\rho}{Hk_H k_3 a \pi f_H \sqrt{M_H^2 - 1}} K_{1,2}(M), \quad (2.37)$$

где  $K_{1,2}(M)$  - множитель, стоящий в квадратных скобках, в формулах (2.33) и (2.36). При применении сердечника Б48, имеющего  $D_1 = 20$  мм,  $D_2 = 40$  мм,  $H = 20$  мм, значения  $K_1$  и  $K_2$  совпадают. График зависимости  $K_{1,2}(M)$  приведен на рисунке 2.21. Из него следует, что величина  $r_{\min}$ , соответственно и  $F_{TP\min}$ , уменьшается с увеличением коэффициента частотных искажений  $M$ , то есть при

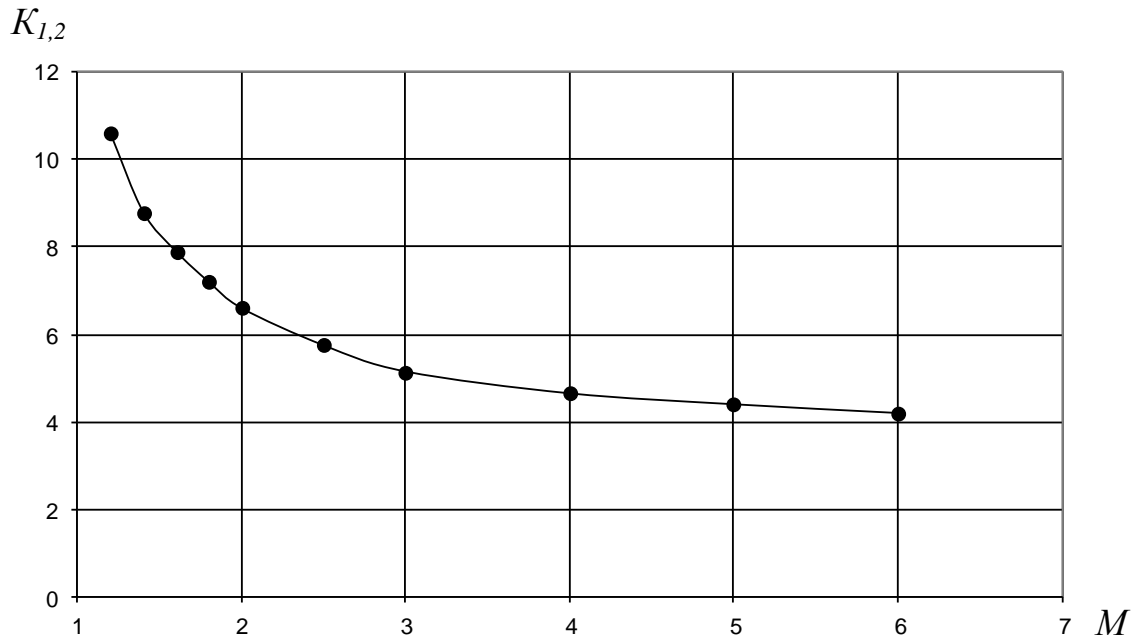


Рисунок 2.21 - График зависимости  $K_{1,2}(M)$

уменьшении рабочей частоты. Однако при больших значениях  $M$  становятся несправедливыми выражения 2.20 и 2.21, определяющие оптимальное значение коэффициента трансформации и чувствительности с учетом шумов усилителя. То есть значительное увеличение  $M$  приводит к увеличению веса шумов усилителя и снижению чувствительности. Поэтому не рекомендуется при нерезонансном согласовании иметь  $M \gg 1$ . Для сердечника Б48 из феррита 2000 НМ при применении медного провода и, полагая  $k_H = k_3 = 0,9$ ,

$$F_{TP\min} \approx 1 + 0,36 \frac{K_{1,2}(M)}{\pi f_H \sqrt{M^2 - 1}}. \quad (2.38)$$

Если трансформатор рассчитан на работу в широком диапазоне частот, то для большей части диапазона выполняется условие  $M \approx 1$ . В этом случае  $r_{\Sigma}$  имеет минимум при  $D_3 = \sqrt{D_1 D_2}$ :

$$r_{\Sigma \min} = \frac{4R\rho}{Hk_H k_3 a \pi f_H} \frac{1}{\sqrt{M_H^2 - 1}} \frac{D_2 - D_1}{D_1 + D_2 - 2\sqrt{D_1 D_2}}. \quad (2.39)$$

Из 2.22 и 2.39 для сердечника Б48 из феррита 2000 НМ получим коэффициент шума при оптимальном выборе  $D_3$

$$F_{TP \min} \approx 1 + \frac{4}{\pi f_H \sqrt{M_H^2 - 1}}. \quad (2.40)$$

Если  $f_H = 20$  Гц, а  $M_H = 1,41$ , то  $F_{TP \min} = 1,064$ .

Таким образом, для выбранного сердечника  $F_{TP \min}$  определяется только нижней частотой рабочего диапазона и допустимым значением  $M_H$ .

При резонансном согласовании на частоте  $f$  величина индуктивности первичной обмотки определяется емкостью  $C$  электродного датчика:  $L_1 = 1/4\pi^2 f^2 C$ . Число витков первичной обмотки  $W_1 = \sqrt{L_1/a}$ . Заменяя в (2.30) и (2.34)  $W_1^2$  на  $L_1/a$  и, полагая  $M=1$ , в соответствии с (2.22) получим выражение для коэффициента шума резонансного трансформатора

$$F_{TP} = 1 + \frac{\rho}{a\pi^2 f^2 RCHk_H k_3} \left( \frac{D_1 + D_3}{D_3 - D_1} + \frac{D_2 + D_3}{D_2 - D_3} \right), \quad (2.41)$$

который при  $D_3 = \sqrt{D_1 D_2}$  имеет минимальное значение

$$F_{TP \min} = 1 + \frac{2\rho}{a\pi^2 f^2 RCHk_H k_3} \frac{D_2 - D_1}{D_1 + D_2 - 2\sqrt{D_1 D_2}}. \quad (2.42)$$

Для сердечника Б48

$$F_{TP \min} = 1 + \frac{2}{\pi^2 f^2 RC} = 1 + \frac{8}{\omega^2 \tau}, \quad (2.43)$$

где  $\omega = 2\pi f$ ,  $\tau = RC$ . Для ДЭП со сферическими электродами из титана радиусом 5 см (Табл. 2.5) на частоте 20 Гц коэффициент шума резонансного трансформатора равен 1,2, то есть меньше 1 дБ. Броневого сердечник требует экранировки от магнитного поля Земли для устранения микрофонного эффекта, которая может быть выполнена в соответствии с рекомендациями [71].

*б) Тороидальный сердечник*

Тороидальный сердечник предпочтительнее броневое, так как позволяет уменьшить чувствительность трансформатора к внешним магнитным полям и полнее использовать магнитные свойства материала. Можно показать, что для тороидальной катушки на низких частотах, где сопротивление потерь практически совпадает с активным сопротивлением провода на постоянном токе, отношение индуктивности  $L$  к сопротивлению потерь определяется ее конструктивными параметрами. В соответствии с рисунком 2.22 введем обозначения:  $D_1$  и  $D_2$  - внутренний и внешний диаметры сердечника,  $H$  - высота сердечника. Будем считать, что намотка ведется виток к витку с прокладкой межслойной изоляции. Число витков в первом слое намотки

$$W_{1C} = \pi D_1 k_H / d, \quad (2.44)$$

где  $d$  - диаметр медной жилы провода,  $k_H$  - коэффициент, учитывающий неплотность намотки и толщину изоляции провода. Число витков в каждом последующем слое уменьшается на

$$\delta W = \frac{2\pi(d + \Delta)}{d} k_H = 2\pi \frac{k_H}{k_3}, \quad (2.45)$$

где  $\Delta$  - толщина межслойной изоляции, включая изоляцию провода,  $k_3 = d / (d + \Delta)$  - коэффициент заполнения. Число витков в  $i$ -м слое намотки

$$W_{Ci} = W_{C1} - 2\pi \frac{k_H}{k_3} (i - 1) \quad (2.46)$$

а индуктивность катушки

$$L = aW^2 = a \left( \sum_{i=1}^n W_{Ci} \right)^2 = a \left[ nW_{C1} - \pi \frac{k_H}{k_3} (n-1)n \right]^2, \quad (2.47)$$



где  $W$  - число витков катушки,  $n$  - число слоев намотки. Сопротивление катушки

$$r = \sum_{i=1}^n W_{C_i} r_{B_i}, \quad (2.48)$$

где  $r_{B_i}$  - сопротивление витка в  $i$ -м слое намотки. Сопротивление витка в первом слое

$$r_{B_1} \approx 4\rho \frac{D_2 - D_1 + 2H}{\pi d^2} = \frac{4p\rho}{\pi d^2}, \quad (2.49)$$

где  $p$  - периметр сечения сердечника,  $\rho$  - удельное сопротивление материала провода (для меди  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом м). Длина витка в каждом последующем слое увеличивается примерно на  $2\pi(d + \Delta)$ . Отсюда

$$r_{B_i} = r_{B_1} + \frac{8\rho i - 1}{d k_3}. \quad (2.50)$$

Сопротивление катушки постоянному току

$$r = nr_{B_1} W_{C_1} + \left( \frac{8\rho W_{C_1}}{dk_3} - 2\pi r_{B_1} \frac{k_H}{k_3} \right) \frac{n-1}{k_3} n - \frac{8\pi\rho k_H}{3 dk_3^2} (2n-1)(n-1)n. \quad (2.51)$$

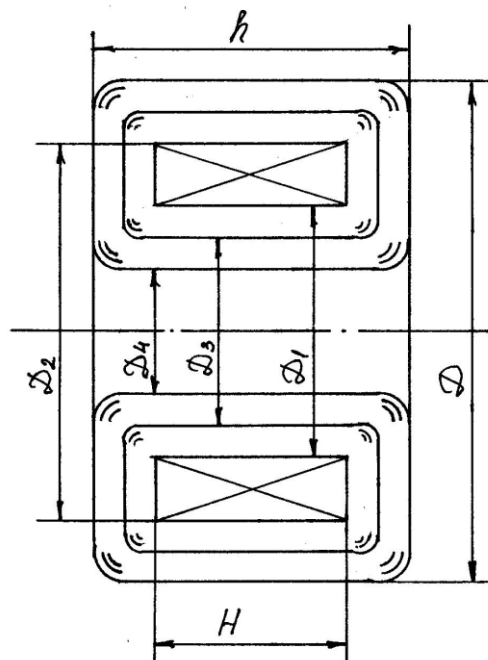


Рисунок 2.22 - Схема расположения обмоток трансформатора на тороидальном сердечнике

При выполнении условия  $W_{C1} \gg 2\pi$  из (2.47) и (2.51) имеем

$$\begin{aligned} r &\approx nr_{B1} W_{C1} \left[ 1 - AB + A(B-1)n - \frac{4}{3} A^2 B n^2 \right], \\ L &\approx an^2 W_{C1}^2 (1 - 2An + A^2 n^2), \end{aligned} \quad (2.52)$$

где  $A = \pi k_H / (W_{C1} k_3) = d / (D_1 k_3)$  - параметр, зависящий от толщины провода;  
 $B = \pi D_1 / p$  - параметр, зависящий от геометрии сердечника ( $p$  - периметр сечения сердечника). Отношение  $L/r$  имеет два сомножителя:

$$\frac{L}{r} = \frac{aW_{C1}}{r_{B1}} f(n), \quad (2.53)$$

где первый - дробь - определяет добротность первого слоя намотки, а второй - функция числа слоев

$$f(n) = \frac{A^2 n^3 - 2An^2 + n}{1 - AB + A(B-1)n - \frac{4}{3} A^2 B n^2}. \quad (2.54)$$

При  $W_{C1} \gg 2\pi$  параметр  $A \approx 0,05$  и менее. Для большинства типоразмеров ферритовых сердечников  $B = 1 - 3$ . График функции  $f(n)$  при разных значениях  $A$  и  $B$  приведен на рисунке 2.23. При расчете принималось во внимание, что  $n_{\max} = 0,5/A$ . Из рисунка следует, что, начиная с  $n = (0,5 \dots 0,6)n_{\max}$ , рост добротности становится небольшим, следовательно, увеличение толщины намотки свыше (50 - 60)% от максимально возможной является нецелесообразным. Из (2.47) число витков тороидальной катушки

$$W = n[W_{C1} - \pi(n-1)k_H / k_3]. \quad (2.55)$$

Обозначим через  $D_3$  диаметр границы раздела первичной и вторичной обмоток трансформатора (рисунок 2.22). Пусть для конкретности первой наматывается первичная обмотка. Число слоев в первичной обмотке

$$n_1 = (D_1 - D_3)k_{31} / (2d_1), \quad (2.56)$$

где  $d_1$  - диаметр провода первичной обмотки без изоляции;  $k_{31}$  - коэффициент заполнения для первичной обмотки, учитывающий также и изоляцию провода.

Принимая во внимание, что  $W_{C1} \gg 2\pi$  и  $k_H \approx k_3$ , из (2.55) и (2.56) имеем

$$d_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi k_{H1} k_{31}}{W_1} (D_1^2 - D_3^2)}. \quad (2.57)$$

Аналогично

$$d_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi k_{H2} k_{32}}{W_2} (D_3^2 - D_4^2)}, \quad (2.58)$$

где  $D_4$  - внутренний диаметр катушки трансформатора (рисунок 2.22).

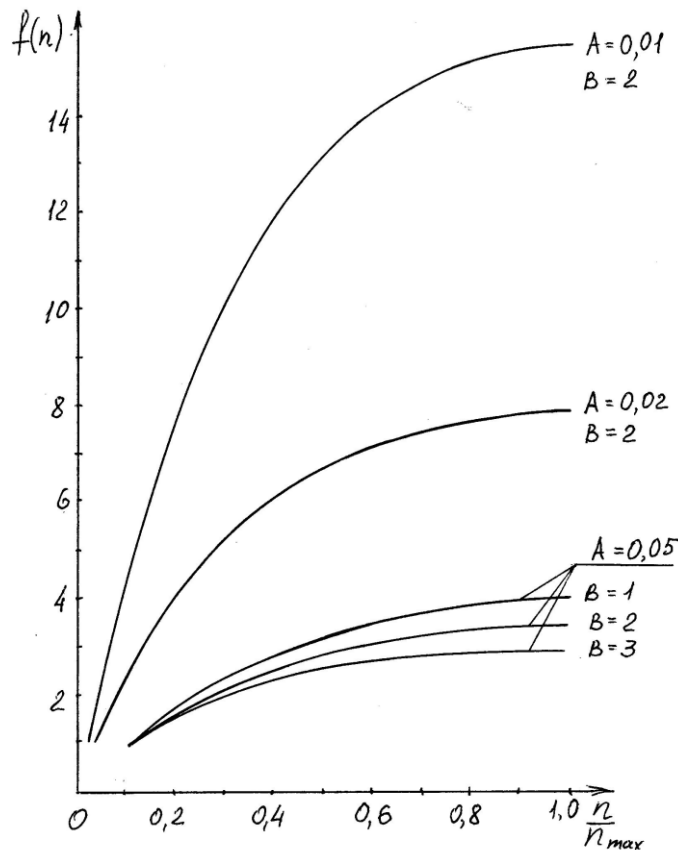


Рисунок 2.23 - График зависимости  $f(n)$  при разных значениях параметров  $A$  и  $B$

На основании (3.49), (3.52), (3.53), учитывая, что  $AB \ll 1$ , сопротивление первичной обмотки

$$r_1 \approx \frac{16 p \rho W_1^2}{\pi^2 k_{31} k_{H1}} \frac{6D_1^2 + 3(B-1)(D_1 - D_3)D_1 - 2B(D_1 - D_3)^2}{D_1(D_1 - D_3)(D_1 + D_3)^2}. \quad (2.59)$$

Выражение для  $r_2$  получается по аналогии с (2.59) заменой  $D_3$  на  $D_4$ ,  $W_1$  на  $W_2 = nW_1$ ,  $p$  на  $p + \pi(D_1 - D_3)$ ,  $B$  на  $\pi D_3 / [p + \pi(D_1 - D_3)]$ . При не слишком

большой разнице в диаметре провода обмоток  $k_{31}k_{H1} = k_{32}k_{H2} = k_3k_H$ . Вводя обозначения  $m = D_3 / D_1$ ,  $c = D_4 / D_1$ , получим

$$r_{\Sigma} = 16\rho W_1^2 z / (\pi k_H k_3 D_1), \quad (2.60)$$

где

$$z = \frac{6 + 3(B-1)(1-m) - 2B(1-m)^2}{B(1-m)(1+m)^2} + \frac{3(m+c)(B+1) - 2B(m+c)^2 + 2Bmc}{B(m-c)(m+c)^2}. \quad (2.61)$$

В соответствии с [70] (Кузнецов)  $W_1^2 \approx R / (a\omega_H \sqrt{M_H^2 - 1})$ , где  $\omega_H$  – нижняя граница рабочего диапазона частот;  $M_H$  – коэффициент частотных искажений на частоте  $\omega_H$ ;  $a$  – коэффициент пропорциональности (для сердечника прямоугольного сечения [61] (Волгов)  $a = \mu\mu_0 H(D_2 - D_1) / (D_2 + D_1)$ );  $\mu$  – начальная магнитная проницаемость материала сердечника;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $H$  – высота сердечника, то коэффициент шума трансформатора. Тогда

$$F = 1 + \frac{16\rho z}{\pi k_H k_3 a \omega_H D_1 \sqrt{M_H^2 - 1}}. \quad (2.62)$$

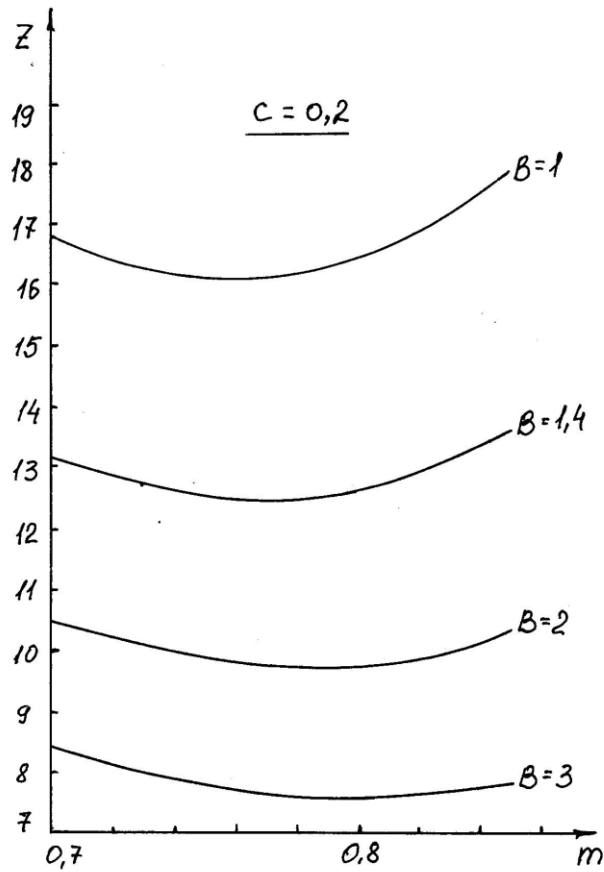
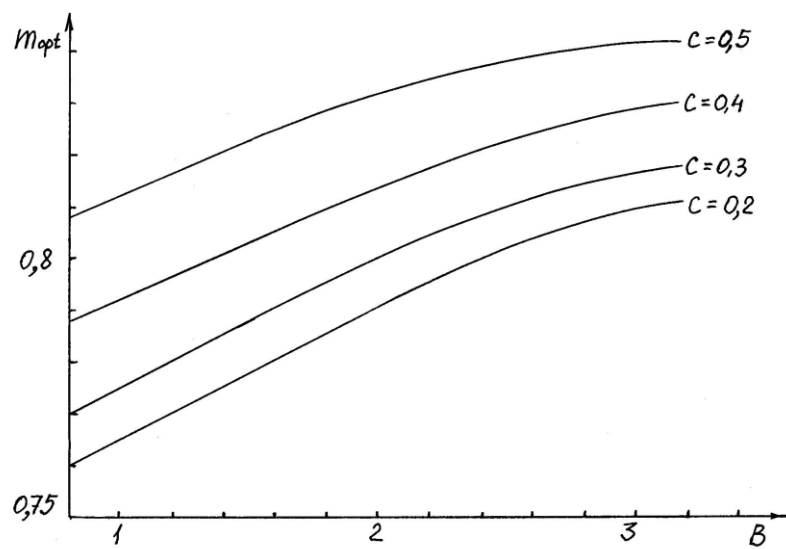
Условия минимума  $F$  совпадают с условиями минимума  $z$ , которые были определены путем расчета зависимостей  $z(m, B)$  по формуле (2.61). Коэффициент  $z$  имеет минимум при  $m = 0,76 - 0,83$  (рисунок 2.24). Зависимости  $m_{opt}(B, c)$ , рассчитанные в соответствии с (2.61), изображены на рисунке 2.25. Зависимость  $Z_{min}(B)$  при  $B = 0,8 - 3,2$  с точностью около 3% аппроксимируется выражением

$$Z_{min} = X / B^{0,73}. \quad (2.63)$$

Значения  $X$  при некоторых значениях  $c$  приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12. Значения  $X$  при разных значениях параметра  $c$

$c$	0	0,2	0,3	0,4	0,5
$X$	16,0	16,4	16,7	17,7	19,3

Рисунок 2.24 - График зависимости  $z(m, B)$ Рисунок 2.25 - График зависимости  $m_{opt}(B, c)$

Коэффициенты  $k_H$  и  $k_3$  при диаметре провода  $d = (0,2 \dots 0,5)$  мм можно принять равными соответственно  $(0,7 \dots 0,8)$  и  $(0,4 \dots 0,5)$  при прокладке межслойной изоляции тонкой лакотканью. Дальнейшая оптимизация трансформатора связана с выбором оптимальных размеров сердечника, исходя из максимально допустимых диаметра  $D$  и высоты  $h$  трансформатора. При послойной намотке обмоток толщина намотки во все стороны от сердечника одинакова, значит

$$D = D_2 + D_1(1-c), \quad h = H + D_1(1-c). \quad (2.64)$$

С учетом (2.62) – (2.64)

$$F_{\min} = 1 + \frac{2,21\rho XY}{\mu\mu_0 k_H k_3 D^2 \omega_H \sqrt{M_H^2 - 1}}, \quad (2.65)$$

где

$$Y = (1 + cg)(1 + 2l + 3cg - 4g)^{0,73} / [(l - g + cg)(1 - 2g + cg)g^{1,73}], \quad g = D_1 / D, \quad l = h / D.$$

Зависимости  $Y(g, l)$  (рисунок 2.26) имеют минимум при некотором значении  $g_{opt}$ , которое при  $c = (0,2 \dots 0,5)$  находится по графикам (рисунок 2.27). Зависимости  $Y_{\min}(l, c)$  приведены на рисунке 2.28. Минимальное значение  $F_{\min}$  определяется

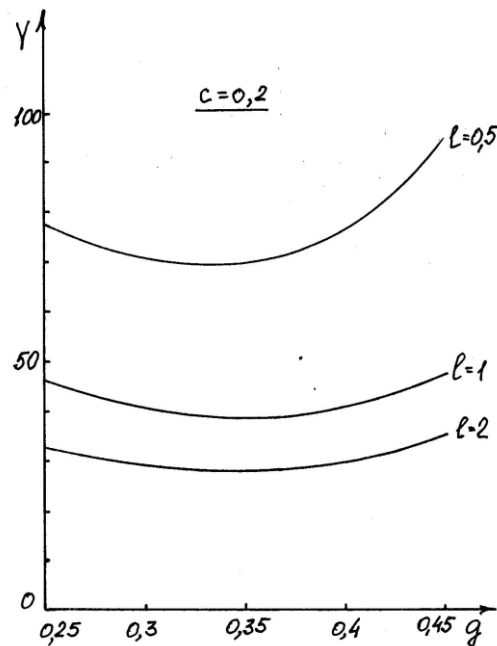
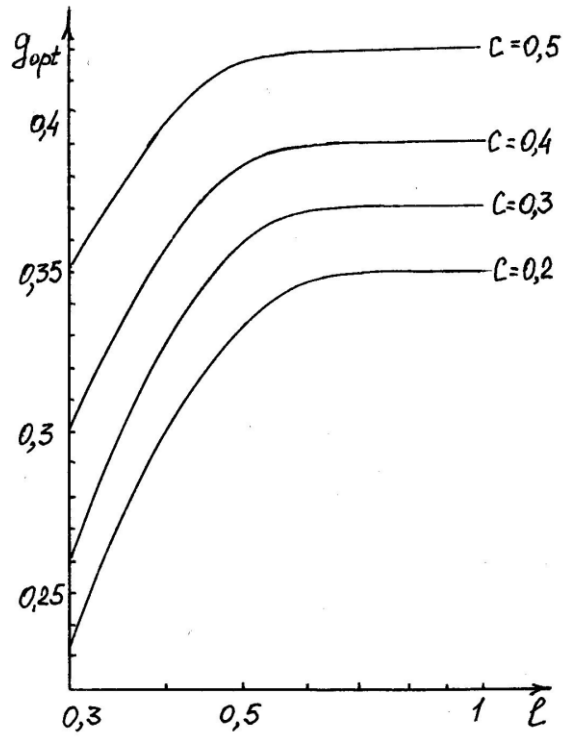
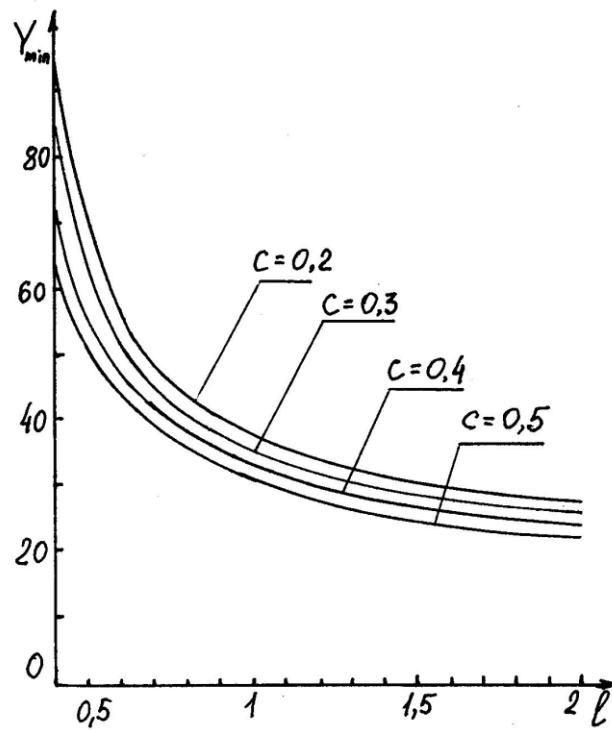


Рисунок 2.26 - Зависимость  $Y(g, l)$

Рисунок 2.27 - Зависимость  $g_{opt}(l, c)$ Рисунок 2.28 - Зависимость  $Y_{min}(l, c)$

произведением  $X Y_{\min}$  и в соответствии с приведенными выше значениями  $X$  и рисунком 2.28 достигается при  $c = (0,4 \dots 0,5)$ .

Таким образом, для достижения минимального коэффициента шума рекомендуется заполнять внутренний диаметр сердечника проводом на 50 - 60 % ( $c = 0,4 \dots 0,5$ ). Сердечник следует выбирать по максимально допустимым габаритным размерам трансформатора:  $D_{1opt} = D g_{opt}$ ;  $D_{2opt} = D [1 - g_{opt} (1 - c)]$ ;  $H_{opt} = h - g_{opt} D (1 - c)$ , где  $g_{opt}$  определяется по рисунку 2.27. Оптимальное значение диаметра провода обмоток находят по (2.52), (2.58), исходя из значения  $m_{opt}$ , определяемого по рисунку 2.25. Из выражений 2.37 и 2.65 следует, что при выбранном сердечнике значение  $F_{TP}$  определяется значениями  $M_H$  и  $\omega_H$ . При этом чем больше размеры сердечника, тем меньший коэффициент шума трансформатора может быть получен. Если броневого сердечник сам определяет габариты трансформатора, то при расчете трансформатора на тороидальном сердечнике следует задаваться максимально допустимыми габаритами трансформатора, откуда затем вычисляют оптимальные размеры сердечника.

## ***2.6. Бестрансформаторное согласование электродного датчика с приемным устройством***

Применение входного трансформатора является универсальным способом согласования источника сигнала с приемником с целью достижения наивысшей чувствительности. Однако, помимо чисто конструктивных неудобств, применение трансформатора может привести к ухудшению ряда электрических параметров измерительной системы, в том числе к искажению частотной характеристики, появлению микрофонного эффекта (то есть, к появлению вибрационного шума, о котором говорилось в разделе 1.3), а также, при недостаточно качественном трансформаторе, даже к увеличению шума по сравнению со случаем непосредственного подключения источника сигнала ко входу предварительного усилителя. Кроме трансформаторного согласования при  $R_i < R_{i_{opt}}$ , где  $R_i$  - сопротивление ис-



точника сигнала,  $R_{i\text{опт}}$  - оптимальное по коэффициенту шума сопротивление источника сигнала, применяют согласование путем параллельного включения  $N$  транзисторов в первом каскаде усилителя [39; 40] (Терпугов, Жалуд). Отношение мощности сигнала к мощности шума на выходе усилителя при согласовании нерезонансным трансформатором определяется выражением (2.19). При непосредственном подключении электродного датчика ко входу усилителя (из эквивалентной схемы (рисунок 2.19) следует исключить элементы, относящиеся к трансформатору) получим

$$\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = \frac{e_c^2}{4kTR \left[ 1 + \frac{1}{2} (F_{\text{усмин}} - 1) \left( q + \frac{1 + \omega^2 \tau^2}{q \omega^2 \tau^2} \right) \right]}, \quad (2.66)$$

где  $q = R / R_{i\text{опт}}$ .

Определим диапазон значений активного сопротивления  $R$  датчика, в котором применение входного трансформатора нежелательно или необязательно.

Приравнявая (2.19) и (2.66), получим

$$R_{\text{мин, макс}} = R_{i\text{опт}} \left[ B \pm \sqrt{B^2 - \frac{1 + \omega^2 \tau^2}{\omega^2 \tau^2}} \right], \quad (2.67)$$

где

$$B = \frac{F_{\text{тр}} - 1}{F_{\text{усмин}} - 1} + \frac{\sqrt{1 + (\omega \tau F_{\text{тр}})^2}}{\omega \tau}.$$

Из (2.66) следует, что при непосредственном подключении датчика ко входу усилителя коэффициент шума равен

$$F = 1 + 0,5 (F_{\text{усмин}} - 1) \left( q + \frac{1 + \omega^2 \tau^2}{q \omega^2 \tau^2} \right). \quad (2.68)$$

В выражения (2.67) и (2.68) входят величины  $R_{i\text{опт}}$  и  $F_{\text{усмин}}$ . Наименьшим значением  $F_{\text{усмин}}$  обладают полевые транзисторы с р-п переходом, которые обеспечивают величину  $F_{\text{усмин}}$  в сотые доли дБ при значениях  $R_{i\text{опт}}$  в зависимости от рабочей частоты от сотен килоом до единиц мегаом. Биполярные транзисторы позволяют получить  $F_{\text{усмин}}$  порядка единиц децибел при  $R_{i\text{опт}}$  в единицы килоом.

Произведем расчет коэффициента шума по формуле (2.68) для электродного датчика, работающего на частоте 90 Гц совместно с предварительным усилителем двух типов: на отечественных полевых транзисторах КП303А с  $F_{\text{ус мин}} = 0,05$  дБ и  $R_{i\text{опт}} = 1$  Мом, и отечественных биполярных транзисторах КТ3107Е с  $F_{\text{ус мин}} = 2$  дБ и  $R_{i\text{опт}} = 3$  Ком. Пусть датчик имеет значение  $\omega\tau = 0,2$ , которое, как следует из таблиц 2.2 - 2.7, характерно для многих материалов при небольших размерах электродов. Результаты расчета приведены в таблице 2.13. Минимум коэффициента шума с усилителем на полевых транзисторах, равный 1,06, достигается при  $R = 5,1$  Мом. Минимум коэффициента шума с усилителем на биполярных транзисторах, равный 4, достигается при  $R = 15,3$  Ком. Из таблицы 2.13 видно, что минимум зависимостей  $F(R)$  стал больше и сместился в сторону больших значений  $R$ , чем при чисто активном источнике сигнала. Как было показано выше, реальные значения сопротивления  $R$  датчика даже при площади электродов меньше  $1 \text{ см}^2$  не превышает десятков Ом, что делает невозможным непосредственное подключение датчика к усилителю. По данным таблиц 2.2 - 2.7 у электродов с площадью поверхности порядка  $300 \text{ см}^2$  сопротивление  $R$  датчика близко к значению 1 Ом при  $\omega\tau \approx 1,5$ . Расчет коэффициента шума для этого случая показывает (см. таблицу 2.14), что его минимальное значение приблизилось к  $F_{\text{ус мин}}$  и достигается при сопротивлении  $R$ , мало отличающегося от  $R_{i\text{опт}}$ . Однако и в этом случае непосредственное подключение датчика к усилителю дает огромное значение коэффициента шума. Можно использовать параллельное включение транзисторов в первом каскаде предварительного усилителя. В этом случае значение  $R_{i\text{опт}}$  уменьшается в число параллельно включенных транзисторов, а величина  $F_{\text{ус мин}}$  не изменяется. Однако для согласования датчика с усилителем потребуется нереально большое число транзисторов. В частности, для согласования датчика с усилителем на биполярных транзисторах потребуется несколько тысяч параллельно включенных транзисторов, если же усилитель выполнен на полевых тран-

зисторах – несколько сотен тысяч. Поэтому практически единственно приемлемым способом согласования является трансформаторное согласование.

Таблица 2.13. Коэффициент шума усилителя на частоте 90 Гц при  $\omega\tau = 0,2$

$F_{\text{ус мин}}$ , дБ	Активное сопротивление датчика R, Ком								
	0.1	0,3	1	3	10	30	100	1000	10000
0,05	–	–	–	–	16,1	6,03	2,51	1,157	1,073
2	227	76,4	23,7	8,83	4,23	4,65	–	–	–

Таблица 2.14. Коэффициент шума усилителя на частоте 90 Гц при  $\omega\tau = 1,5$

$F_{\text{ус мин}}$ , дБ	Активное сопротивление датчика R, Ком								
	0.1	0,3	1	3	10	30	100	1000	10000
0,05	–	–	–	–	9,38	1,84	1,084	1,014	1,059
2	13,58	5,22	2,35	1,71	2,09	–	–	–	–

При этом применение полевых транзисторов КП303А позволяет получить коэффициент шума примерно на 2 дБ меньше по сравнению с биполярными транзи-

сторами КТ3107Е. Однако коэффициент трансформации при использовании биполярных транзисторов на порядок меньше, следовательно, трансформатор имеет гораздо меньшее число витков во вторичной обмотке и при одинаковых габаритах с трансформатором для усилителя на полевых транзисторах имеет меньший коэффициент шума, так как диаметр провода обмоток может быть увеличен.

Электродный датчик электрического поля был использован в экспериментах по поиску проложенного по дну пресноводного озера кабеля по излучаемому им электромагнитному полю [72]. Он представлял собой два цилиндрических электрода из нержавеющей стали Х18Н9Т, расположенных на расстоянии 2 м друг от друга. Материал для электродов был выбран в соответствии с исследованиями составляющих импеданса электродов (раздел 2.2). Частота излучения составляла 93 кГц. Шум датчика на столь высоких частотах можно считать тепловым, поэтому согласование его с приемником было выполнено в соответствии с результатами раздела 2.5. Активное сопротивление датчика в пресной воде составляло около 800 Ом. Предварительный усилитель был собран на транзисторах КТ 3107Е, оптимальное сопротивление источника для которых на частоте 93 кГц составляло около 4 кОм. Для оптимального согласования датчика в первом каскаде усилителя было применено параллельное включение 5 транзисторов, что позволило получить без использования входного трансформатора коэффициент шума усилителя менее 1,5 дБ. Глубина озера составляла около 3 м, напряженность электрического поля помех – 2...6 мкВ/м. При силе тока в кабеле 6 мкА его электрическое поле уверенно регистрировалось на расстоянии до 40 м от оси кабеля.

Также рекомендации разделов 2.1 и 2.2 по выбору материала электродов, чистоты обработки их поверхности и защиты их от механических повреждений были использованы при конструировании промышленного датчика электромагнитного поля для гидрофизических исследований в КБ Связьморпроект (Санкт-Петербург).

## 2.7. *Предельная чувствительность электродного датчика и приемного устройства с электродным датчиком*

Предельная чувствительность электродного датчика в соответствии с (2.9) и определением предельной чувствительности, данным во введении, определяется величиной его теплового шума  $e = \sqrt{4kTR\Delta f}$ , отнесенной к расстоянию между электродами. Здесь  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура,  $R$  – активная составляющая импеданса датчика,  $\Delta f$  - полоса частот, в которой измеряется шум. В соответствии с таблицами 2.2 – 2.7 на частоте 90 Гц для датчика со сферическими электродами радиусом  $a = 5$  см, расположенными на расстоянии  $l = 1$  м в морской воде с проводимостью  $\sigma = 4$  сим/м, предельная чувствительность составляет около  $0,12 \dots 0,14$  нВ/м $\sqrt{\text{Гц}}$  для всех приведенных в таблицах материалов. Это обусловлено тем, что на частоте 90 Гц главную часть активного сопротивления датчика  $R$  составляет одинаковое для всех материалов сопротивление растекания. Для увеличения предельной чувствительности необходимо уменьшать активное сопротивление датчика  $R$ , что может быть достигнуто увеличением площади электродов и выбором материала, а также увеличивать расстояние  $l$  между электродами до максимально возможного. Увеличение  $l$  ведет к пропорциональному росту напряжения сигнала, при этом величина  $R$  практически не изменяется. Приемное устройство в целом, использующее электродный датчик электромагнитного поля, обладает худшей чувствительностью, поскольку содержит шумящие элементы. Основное влияние на чувствительность приемного устройства оказывают шумовые параметры предварительного усилителя и трансформатора. Для конкретности определим предельную чувствительность  $E_{\text{мин}}$  приемного устройства с указанным выше датчиком при разных материалах электродов на частоте  $f = 90$  Гц. Эта частота близка к оптимальному значению при связи с подводным объектом (см. раздел 1.4). Значения  $E_{\text{мин}}$  при резонансном и нерезонансном согласовании с предварительным усилителем, имеющим коэффициент шума  $F_{\text{усмин}} = 0,05$  дБ и  $F_{\text{усмин}} = 2$  дБ, рассчитанные по (2.5), (2.6), (2.16) и (2.21)

в соответствии с таблицей 2.1, приведены в таблице 2.15. Коэффициент шума 0,05 дБ достижим в качественном усилителе на полевых транзисторах, например, отечественных КП 303А. Коэффициент шума 2 дБ характерен для качественного усилителя на биполярных транзисторах, например, отечественных КТ 3107Е.

Таблица 2.15. Предельная чувствительность приемного устройства с электродным датчиком  $E_{\text{мин}}$ ,  $\text{нВ}/\text{м}\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 90 Гц

Материал	Резонансное согласование				Нерезонансное согласование			
	$F_{\text{усмин}} = 0,05 \text{ дБ}$		$F_{\text{усмин}} = 2 \text{ дБ}$		$F_{\text{усмин}} = 0,05 \text{ дБ}$		$F_{\text{усмин}} = 2 \text{ дБ}$	
	$F_{\text{тр}} = 1 \text{ дБ}$	$F_{\text{тр}} = 2 \text{ дБ}$	$F_{\text{тр}} = 1 \text{ дБ}$	$F_{\text{тр}} = 2 \text{ дБ}$	$F_{\text{тр}} = 1 \text{ дБ}$	$F_{\text{тр}} = 2 \text{ дБ}$	$F_{\text{тр}} = 1 \text{ дБ}$	$F_{\text{тр}} = 2 \text{ дБ}$
Никель	0,13	0,14	0,16	0,17	0,13	0,14	0,15	0,16
Ниобий	0,13	0,14	0,15	0,16	0,13	0,15	0,15	0,16
Сталь Х18Н9Т	0,15	0,16	0,18	0,19	0,15	0,16	0,18	0,19
Золото (покрытие)	0,15	0,19	0,17	0,20	0,13	0,15	0,16	0,17
Титан	0,13	0,14	0,15	0,16	0,13	0,14	0,16	0,18
Тантал	0,13	0,14	0,15	0,16	0,13	0,14	0,16	0,17

Предварительный усилитель на полевых транзисторах имеет высокое значение  $R_{i_{\text{опт}}}$ , поэтому согласующий трансформатор имеет большое число витков во вторичной обмотке. Коэффициент шума трансформатора в этом случае будет выше, чем при согласовании датчика с предварительным усилителем на биполярных транзисторах. Тем самым уменьшается разница в значении  $E_{\text{мин}}$  при использовании усилителей на полевых и биполярных транзисторах. Можно отметить небольшую разницу в чувствительности при резонансном и нерезонансном согласовании, которая находится в пределах точности импедансных измерений. Заметим, что при одинаковом качестве усилителя и согласующего трансформатора нерезонансное согласование обеспечивает несколько более высокую чувствительность, чем резонансное, для тех датчиков, которые имеют большое значение постоянной времени  $\tau$  (никель, золото). Резонансное согласование более выгодно для датчиков с небольшим значением постоянной времени  $\tau$  (титан, тантал), когда добротность датчика  $Q = 1/\omega\tau$  больше единицы. При этом нерезонансное согласование требует применения трансформатора с большой индуктивностью первичной обмотки, поэтому можно ожидать, что его коэффициент шума будет несколько больше, чем у резонансного трансформатора. Как следует из (2.16) и (2.21), зависимость чувствительности от коэффициента шума трансформатора при нерезонансном согласовании выражена слабее, чем при резонансном. Применение предварительного усилителя с  $F_{\text{усмин}} = 0,05$  дБ и трансформатора с  $F_{\text{тр}} = 1$  дБ при нерезонансном согласовании дает значения предельной чувствительности приемного устройства близкое к предельной чувствительности самого датчика. Нерезонансное согласование обеспечивает высокую чувствительность в широком диапазоне частот, при этом увеличивает стабильность коэффициента передачи входной цепи при нестабильной величине параметров импеданса датчика, например, из-за загрязнения поверхности электродов нефтепродуктами. Резонансное согласование следует применять только при работе на фиксированной частоте и в условиях, обеспечивающих стабильность импеданса датчика (например, в отсутствие загрязнения электродов нефтепродуктами).

Учитывая все изложенные факторы, автор рекомендует применение нерезонансного согласования, если не возникнут сложности с изготовлением согласующего трансформатора, имеющего коэффициент шума не более 2...3 дБ, и следующие материалы для электродов: ниобий, никель, сталь нержавеющей Х18Н9Т, титан. Золото не имеет преимуществ перед другими материалами. На практике для защиты электродов от механических повреждений и воздействия потока жидкости часто используют обтекатели с электроконтактными отверстиями, увеличивающими активное сопротивление датчика. Как правило, обтекатели не приводят к заметному нарушению однородности электрического поля, поэтому ЭДС сигнала для датчика с обтекателями по-прежнему определяется выражением (2.8). При этом изменяются импедансные характеристики датчика, что приводит к изменению условий согласования и увеличению теплового шума датчика.

Пусть датчик имеет танталовые сферические электроды радиусом 5 см, расположенные на расстоянии 1 м друг от друга. Предварительный усилитель и согласующий трансформатор имеют коэффициент шума 2 дБ. Согласно таблице 2.15 такой датчик имеет предельную чувствительность  $0,17 \text{ нВ} / \text{м} \sqrt{\text{Гц}}$ . Пусть обтекатель увеличивает его активное сопротивление в 10 раз. Расчет по (2.15) и (2.16) показывает, что при резонансном согласовании значение оптимального коэффициента трансформации при этом не изменилось, а предельная чувствительность ухудшилась в 10 раз. При нерезонансном согласовании в соответствии с (2.20) и (2.21) оптимальное значение коэффициента трансформации уменьшается в 2,7 раза, а предельная чувствительность ухудшается в 3 раза. Преимущество нерезонансного согласования в этом случае очевидно. Обтекатели применяют на движущихся датчиках, но в этом случае существует еще, так называемый, шум движения датчика (см. раздел 1.3), который многократно превосходит тепловой шум и наравне с принимаемым сигналом передается на вход приемника. Применение обтекателя, как показано в следующей главе, помогает уменьшить шум движения, не уменьшая ЭДС сигнала, и в результате добиться увеличения отно-



шение сигнал-шум. Однако это увеличение может быть достигнуто только тогда, когда шум движения уменьшается в большей степени, чем принимаемый сигнал. В соответствии с (2.11) при резонансном согласовании коэффициент передачи входной цепи при увеличении активного сопротивления датчика в 10 раз также уменьшается в 10 раз. При этом нельзя однозначно говорить о выигрыше в отношении сигнал-шум. При нерезонансном согласовании увеличение активного сопротивления практически не влияет на коэффициент передачи сигнала, что делает выигрыш в отношении сигнал-шум при применении обтекателей более заметным.

### ***2.8. Краткие выводы***

Отметим наиболее важные результаты, полученные в главе 2. В отсутствие движения даже у благородных и некорродирующих металлов обнаружен электрохимический электродный шум, который мы называем избыточным, не исчезающий и через несколько суток выдержки в электролите. Его величина зависит от материала электродов, шероховатости их поверхности и длительности выдержки их в электролите. Шум имеет спектр типа  $f^{-\alpha}$ . У тантала и титана, наиболее пригодных для применения в электродных датчиках, отношение избыточного шума к тепловому на частотах в единицы герц достигает нескольких раз. На частотах выше нескольких десятков герц избыточный шум у хорошо отполированных и длительно выдержанных в электролите электродов из таких металлов меньше теплового. У электродов из меди и медных сплавов превышение избыточного шума над тепловым по напряжению на частотах ниже 20 Гц достигает порядка и более, оставаясь и на более высоких частотах существенно больше единицы. При малом времени выдержки в электролите у электродов из нержавеющей стали и, в меньшей степени, из тантала и титана наблюдаются шумовые импульсы, увеличивающие дисперсию шума в десятки раз. Обычно они исчезают после выдержки электродов в электролите более 3 суток, но после механического повреждения поверхности появляются вновь. Уменьшить импульсный

шум помогает полировка электродов. Тепловой шум датчика определяется величиной активной составляющей его импеданса. Выполнены измерения составляющих импеданса электродного датчика при длительном нахождении его в растворе NaCl, имитирующем морскую воду. Определен коэффициент трансформации при трансформаторном согласовании датчика с приемным устройством, при котором достигается наивысшая предельная чувствительность. По результатам измерения параметров импеданса проведено сравнение материалов по достигаемой предельной чувствительности датчика. Сравнение выполнено для резонансного и нерезонансного трансформаторного согласования электродного датчика с приемным устройством. Оно показало, что в обоих случаях предельная чувствительность практически одинакова. При этом нерезонансное согласование менее чувствительно к коэффициенту шума согласующего трансформатора и к увеличению сопротивления датчика при применении обтекателей. Выполнена оптимизация входного трансформатора на минимум коэффициента шума. К числу рекомендованных для использования в электродных датчиках металлов можно отнести тантал, титан, нержавеющую сталь. Однако окончательный выбор можно сделать только после исследования шума датчиков из отобранных выше материалов в условиях движения относительно жидкости. Такое исследование проведено в главе 3.

## Глава 3. Шумы электродных датчиков при движении в морской воде [73-84]

### *3.1. Электродный шум при движении датчика относительно электролита*

Наличие специфического шума при обтекании движущимся электролитом электродного датчика отмечается многими авторами [23; 25; 32; 45-47; 52], однако его подробное исследование отсутствует. Для измерения этого шума, который мы будем называть шумом движения, необходимо обеспечить движение жидкости относительно электродов, не создавая при этом электрических помех в исследуемом диапазоне частот. В наших первых экспериментах по исследованию шума движения жидкость двигалась самотеком за счет перепада высот между резервуаром с электролитом и камерой с исследуемыми электродами. При этом, однако, скорость ее не оставалась постоянной, что создавало трудности в исследовании зависимости величины шума от скорости жидкости. В процессе исследований нами обнаружена зависимость интенсивности коррозионного шума от скорости жидкости. В наших экспериментах, если это не оговорено особо, морская вода заменялась близким к ней по составу раствором NaCl с концентрацией 35 г/л, что соответствует средней солености воды в океане. На рисунке 3.1 показана зависимость шумового напряжения двух медных электродов от скорости жидкости, измеренного на частоте 5 Гц в полосе 1 Гц. Электроды имели рабочую поверхность в виде круга диаметром 4 мм и располагались на расстоянии 40 мм дуг от друга. Эти электроды использовались в качестве датчика скорости, при этом зависимость шумового напряжения от скорости жидкости являлась градуировочной кривой датчика скорости. Такой датчик позволил измерять скорость потока электролита в диапазоне 0,2 - 1,0 м/с с точностью около 15%. Недостатком такого датчика является изменение состояния поверхности электродов в процессе коррозии, что вызывает необходимость калибровки датчика перед измерениями.

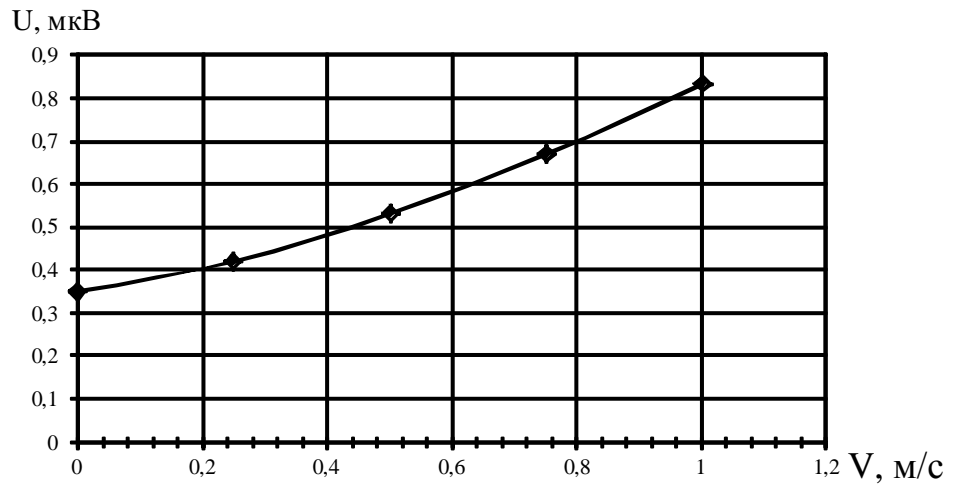


Рисунок 3.1 - Градуировочная кривая датчика скорости движения жидкости

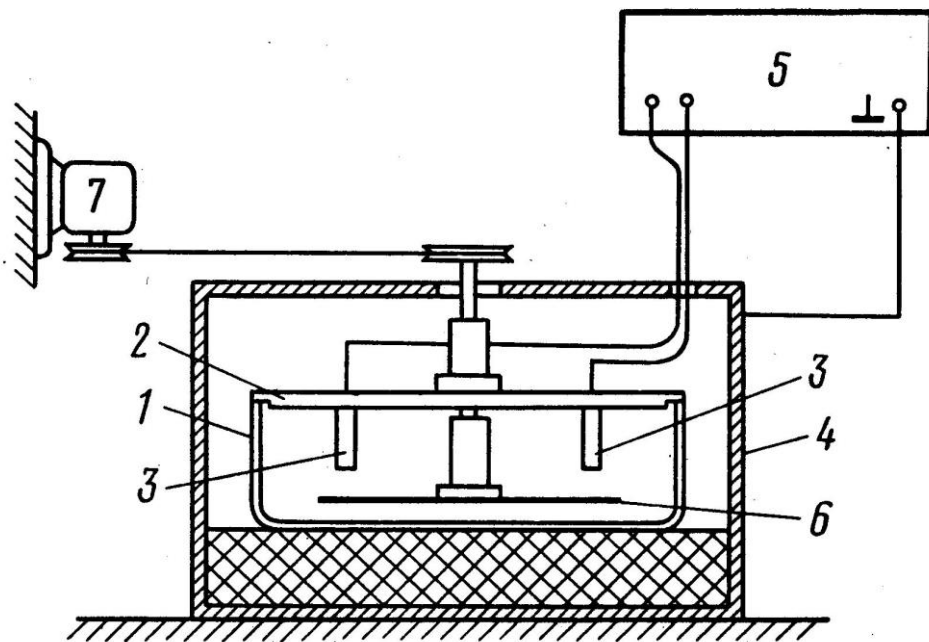


Рисунок 3.2 - Схема экспериментальной установки для измерения электродного шума

Для обеспечения более высокой и постоянной скорости движения электролита создана экспериментальная установка (рисунок 3.2). Она состоит из круглой стеклянной ванны 1 объемом 2,4 литра с герметически закрывающейся крышкой 2, на которой укреплены исследуемые электроды 3, трехслойного электростатиче-

ского и магнитостатического экрана 4 из листовой стали толщиной 10 мм, предназначенного для защиты электродов от воздействия внешних помех, и малошумящего измерительного усилителя 5 с дифференциальным входом. Ванна заполнена электролитом, приводящимся в движение с помощью активатора 6, ось которого проходит через уплотнение в крышке ванны. Вращение активатора осуществляется бесколлекторным электромотором 7, установленным вне защитного экрана, посредством резинового пассика. Активатор представляет собой диск из эбонита с радиально расположенными ребрами. Рабочие поверхности электродов находятся на расстоянии 5 мм от вершины ребер активатора. Это позволяет определять скорость потока жидкости относительно электрода как  $V = \omega r$ , где  $\omega$  - угловая скорость активатора,  $r$  - расстояние от оси вращения до электрода. Точность такого определения скорости электролита при сопоставлении с результатами измерений другими методами составляет 5 - 8 %. Исследуемые электроды имели форму цилиндра, боковая поверхность которого изолирована от электролита нитрокраской, а в качестве рабочей поверхности использовалась полированная торцевая поверхность. Эксперимент проводился в несколько этапов. На первом этапе исследован шум электродов из имевших низкий уровень шума в отсутствие движения тантала и титана марки ВТ-10, а также из имевших высокий уровень шума меди марки М1 и латуни марки ЛС-59. Все электроды перед измерениями выдержаны в электролите в течение 96...240 часов. Диаметр танталовых и титановых электродов равен 10 мм, медных и латунных - 4 мм. Измерение электродного шума производилось на фиксированных частотах 3,5,7,10,15,20 и 30 Гц с помощью измерительного усилителя. Усилитель работал в режиме селективного нановольтметра, а его частотная характеристика имела такой же вид, как и у одиночного колебательного контура с добротностью от 1 до 100. Собственный шум измерительного усилителя 5 составлял от  $10 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 3 Гц до  $4 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 30 Гц, входное сопротивление – 100 Мом. Расчетная спектральная плотность теплового шума электродов не превышала  $10 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ . На рисунке 3.3 представлены спектральные характеристики электродного шума при

движении электролита (1 – медь, скорость движения  $V = 0$ ; 2 – медь,  $V = 2$  м/с, 3 – медь,  $V = 3$  м/с; 4 – тантал, титан,  $V = 2$  м/с; 5 – латунь,  $V = 2$  м/с, 6 – латунь,  $V = 0$ ). Измеренный электродный шум у медных и латунных электродов уже при отсутствии движения был значительно больше теплового шума и шума усилителя. Шум танталовых и титановых электродов в отсутствие движения был близок к шуму измерительного усилителя, поэтому не измерялся.

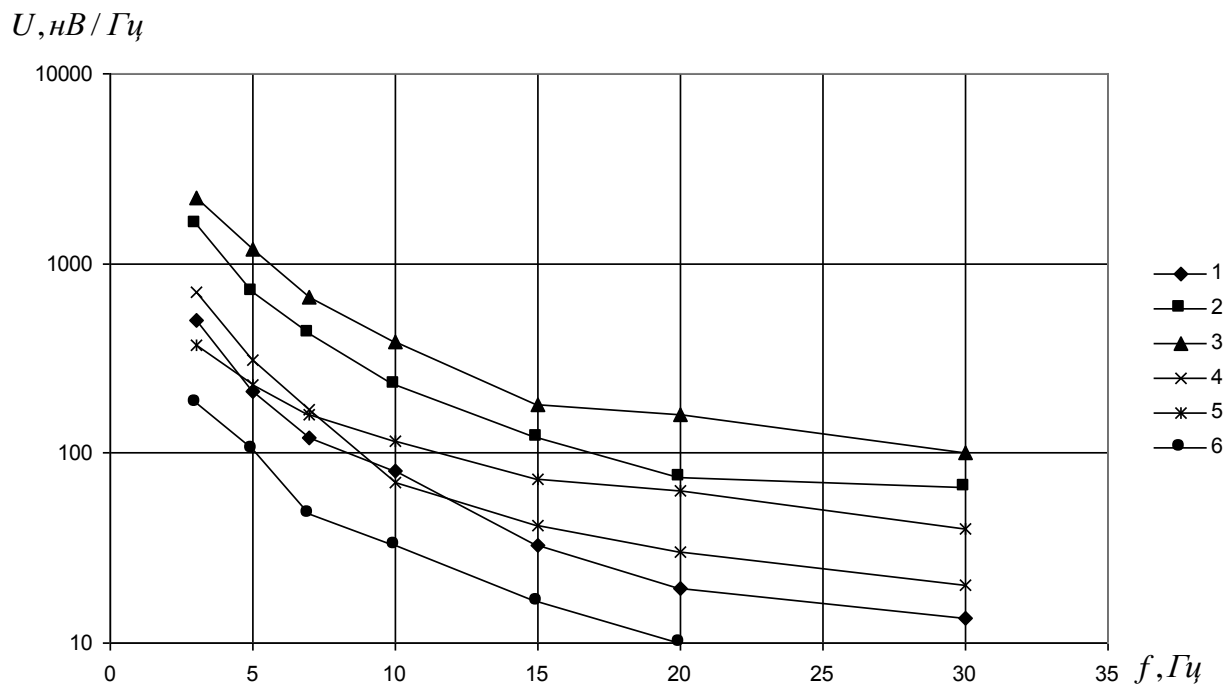


Рисунок 3.3 - Спектральные характеристики электродного шума при движении электролита.

1,2,3 – медь,  $V=0$ ,  $V=2$  м/с,  $V=3$  м/с; 4 – титан, тантал,  $V=2$  м/с; 5, 6 – латунь,  $V=2$  м/с,  $V=0$

При движении электролита шум всех исследуемых электродов возрастал. При этом наибольшие абсолютные значения электродного шума отмечены у медных, а наименьшие на частотах выше 7 Гц – у танталовых и титановых электродов. Спектральная зависимость электродного шума во всех случаях имеет характер типа  $f^{-\alpha}$ . При скорости жидкости  $V = 2$  м/с  $\alpha = 1$  для медных электродов,  $\alpha = 1,5$  для латунных электродов,  $\alpha \approx 1,6$  для титановых и танталовых электродов.

Большое внимание уделялось достоверности измерений. Как и в разделе 2.1, доказано отсутствие влияния внешних помех на результат измерений электродного шума танталовых электродов. С двух пар электродов (электродных ячеек), расположенных в одной ванне, по самостоятельным каналам усиления в полосе до 10 Гц электродный шум подавался на двухканальный самописец. В отсутствие движения не обнаружена корреляция между снимаемыми с них шумовыми напряжениями. Это справедливо также для медных и латунных электродов. Отсутствие влияния внешних помех доказывается и тем, что величина электродного шума различна у электродов из разных металлов; величина электродного шума в отсутствие движения при выключенном электромоторе и включенном электромоторе, но снятом пассиве, одинакова. Сделана оценка влияния на результаты измерений магнитогидродинамических помех, которые могут возникнуть при движении жидкости в магнитном поле Земли, хотя и ослабленном магнитостатическим экраном. Вокруг ванны навита катушка электромагнита, создающая в месте расположения электродов постоянное магнитное поле, вектор которого направлен по оси вращения вертушки, с напряженностью, равной половине напряженности магнитного поля Земли. Включение тока в катушке не изменяло величины электродного шума. Следовательно, влиянием магнитогидродинамических эффектов на шум электродного датчика можно пренебречь.

В ходе эксперимента обнаружено мешающее влияние неравномерности вращения активатора. При неравномерном движении жидкости дифференциальное подключение к измерительному усилителю электродных ячеек с латунными электродами на отдельных частотах вблизи 3,5 и 10 Гц приводило к уменьшению его показаний до двух раз. Еще более заметное уменьшение показаний наблюдалось при дифференциальном подключении танталовой и титановой пар электродов, расположенных диаметрально противоположно на крышке ванны (рисунок 3.4). Оно составило 4 раза на частоте 3 Гц, что свидетельствует об общей причине возникновения шума, связанной с движением жидкости. У медных электродных ячеек вычитания шумовых напряжений при движении жидкости не наблюдалось. При этом электродный шум медных электродов в несколько раз

превышал шум латунных электродов. По-видимому, основную его часть составляет коррозионный шум, величина которого увеличивается при движении электролита, так как оно приводит к увеличению скорости реакции окисления благодаря лучшему поступлению кислорода к поверхности электродов. Заметим, что частота 5 Гц соответствует частоте вращения активатора, а частота 3 Гц – частоте вращения пассика. Неравномерность вращения обусловлена трением в шкивах, непараллельностью осей активатора и электродвигателя, неравномерным износом пассика и сопровождается акустическим шумом при вращении. Уменьшение акустического шума после регулировки установки уменьшало также и величину электродного шума на указанных частотах. Минимизация акустического и электродного шума на частоте 3 Гц и была в дальнейшем объективным критерием регулировки для обеспечения равномерности вращения.

На втором этапе эксперимента производилась одновременная запись шумов с двух разных пар электродов на два канала магнитографа с последующей обработкой записей и попарным сравнением результатов измерений. Использована установка, показанная на рисунке 3.2. Оба канала образованы одинаковыми измерительными усилителями, характеристики которых указаны выше. Скорость движения жидкости возле электродов составляла 5 м/с. Исследовались следующие материалы: тантал, никель, ниобий, бронза КМЦ, титан ВТ-10, выдержанные в электролите более 4000 часов, а также замоченные в электролите за 6 часов

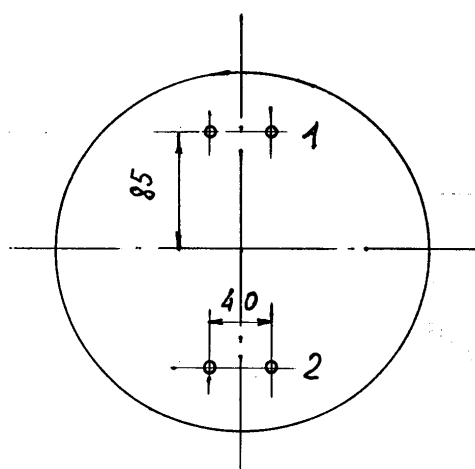


Рисунок 3.4 - Схема расположения электродов на крышке ванны



до эксперимента электроды из тантала с неполированной рабочей поверхностью. Все электроды имели диаметр рабочей поверхности 10 мм. Расположение электродов на крышке ванны показано на рисунке 3.4. Пары электродов 1 и 2 из разных металлов располагались на одинаковом расстоянии от оси активатора диаметрально противоположно от него, что обеспечивало одинаковую скорость движения жидкости и одинаковое влияние создаваемой электродами турбулентности на результаты измерений. Активная составляющая импеданса  $R$  имела величину сотни ом - единицы килоом, чему соответствует спектральная плотность теплового шума в единицы нановольт. Измерялись шумовые напряжения электродных пар 1 и 2 и их отношение на частоте 6 Гц в полосе 0,3 Гц. Собственный шум измерительного усилителя составлял  $8 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ , а точность измерений шумового напряжения - 5%. Основные результаты измерений заключаются в следующем.

а) Длительно выдержанные в электролите танталовые и титановые электроды имеют практически одинаковые значения напряжения шума как в отсутствие движения, так и при движении электролита со скоростью 5 м/с. Измеренный шум в отсутствие движения примерно в 3 раза превышает тепловой шум и в 1,5 раза превышает собственный шум усилителя.

б) Свежезамоченные танталовые электроды, как в отсутствие движения, так и при движении электролита со скоростью 5 м/с имеют напряжение шума в 4 раза больше, чем длительно выдержанные в электролите.

г) Электроды из ниобия и никеля в отсутствие движения имеют напряжения шума примерно такое же, как и тантал и титан. Однако при движении электролита со скоростью 5 м/с шум ниобиевых электродов в 16 раз, а никелевых – в 25 раз превышал шум электродов из тантала.

в) Шумовое напряжение электродов из бронзы КМЦ при движении электролита со скоростью 5 м/с было еще больше и в 40 раз превосходило шумовое напряжение танталовых электродов.

Измерения в диапазоне 100 - 1000 Гц показали, что электродный шум находится ниже уровня чувствительности усилителя, то есть ниже  $4 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ .

Проверено влияние неравномерности вращения на величину электродного шума у разных материалов. При равномерном вращении активатора не обнаружена корреляция между шумовыми напряжениями в полосе 3...10 Гц у электродных ячеек из разных металлов. При искусственно вызванной неравномерности вращения активатора в спектре электродного шума появились всплески на частоте вращения и на ее гармониках. Величина шумового напряжения на частоте 7,9 Гц, равной частоте вращения вертушки, увеличилась в 20 раз для бронзы КМЦ и в 500 раз для выдержанного тантала. Разница шумовых напряжений между ними, достигавшая 40 раз, уменьшилась до 2 раз, а напряжение на свежезамоченных танталовых электродах мало отличалось от напряжения бронзовых электродов. При этом наблюдалась корреляция между напряжениями, записанными одновременно с двух разных пар электродов, в частности, с выдержанных и свежезамоченных танталовых электродов. После уравнивания амплитуд и вычитания в дифференциальном усилителе в спектре разностного шума удалось подавить всплеск на частоте 7,9 Гц. Следовательно, неравномерность скорости потока существенным образом сказывается на величине электродного шума и тем в большей степени, чем ниже электродный шум в отсутствие движения. Напряжение шума на частотах 7,9 Гц, 15,8 Гц, 25,9 Гц у длительно выдержанных в электролите танталовых электродов более чем в 30 раз превышало напряжение шума на соседних частотах. Установлено, что на величину электродного шума, как при движении жидкости, так и в ее отсутствие, оказывает влияние время выдержки электродов в электролите и состояние их рабочей поверхности, шероховатость. Электроды из медных сплавов имеют как большую нестабильность импеданса, так и большие электродные шумы, поэтому непригодны для использования в высокочувствительных измерительных системах. Также и электроды из ниобия и никеля, несмотря на хорошие импедансные характеристики (низкое значение R, большое значение C), имеют значительный шум при движении жидкости, свя-

занный, по-видимому, с особенностями строения их окисного слоя. Наименьшими значениями шума как при отсутствии движения, так и при обтекании их потоком электролита, обладают электроды из титана и тантала, которые и рекомендуются для применения в электродных датчиках.

Можно предположить, что большое электродное напряжение, регистрируемое на гармониках частоты вращения, вызвано модуляцией протекающих в ванне токов. Однако, при столь большом входном сопротивлении измерительного усилителя, которое составляет 100 Мом, наличие гальванических токов в ванне исключено. Стальной вал активатора хорошо изолирован от электродов, и ток между ними тоже протекать не может. Все же, чтобы убедиться в том, что пики на спектральной характеристике не вызваны протекающими в ванне токами неизвестного происхождения, на крышке ванны установлен безбазовый датчик, содержащий две пары одинаковых электродов из нержавеющей стали марки Х18Н9Т, имевшие при движении жидкости практически такой же уровень шума, что и танталовые. Электроды установлены в углах квадрата, одна из диагоналей которого имеет радиальное относительно оси вращения направление. При этом противоположно стоящие электроды электрически соединены, образуя единый электрод. Такой датчик имеет нулевую базу и не воспринимает внешнее электрическое поле. Проведены измерения пика спектральной характеристики на частоте 5,1 Гц, соответствующей частоте вращения активатора (она составляла 300 оборотов в минуту), у двух датчиков - безбазового и обычного, имеющего два таких же электрода, установленных, как на рисунке 3.4. У безбазового датчика это напряжение оказалось даже на 20% больше, чем у обычного двухэлектродного, при этом спектр электродного шума имеет такой же гребенчатый вид, как и у двухэлектродного датчика. Это доказывает, что измеряемое напряжение создается самим датчиком, а не протекающими в ванне токами.

В предыдущих экспериментах неравномерность скорости жидкости была неконтролируемой, что и объясняет некоторую разницу в результатах, касающихся коррелированности шума разных электродных ячеек. Для более детального исследования связи электродного напряжения с неизбежно возникающими

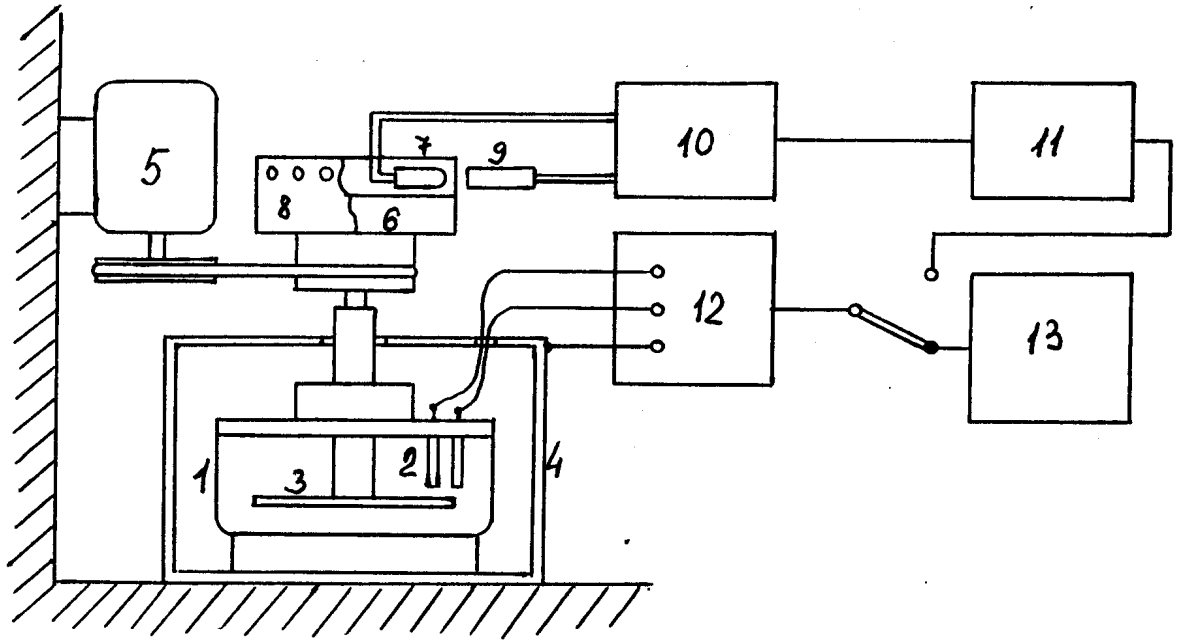


Рисунок 3.5 - Схема экспериментальной установки

пульсациями скорости движения электролита, использована экспериментальная установка (рисунок 3.5), содержащая, как и прежде, стеклянную ванну 1 с крышкой на которой устанавливались исследуемые электроды 2, активатор 3 для приведения электролита в движение, стальной экран 4 и электродвигатель 5. Для стабилизации скорости вращения на валу активатора установлен маховик 6, на который наклеена непрозрачная перфорированная лента 8 для фотоэлектрического датчика скорости вращения активатора. Фотоэлектрический датчик состоял из лампочки накаливания 7, расположенной с одной стороны перфорированной ленты, и фоторезистора 9, расположенного с другой стороны ленты. Электрические импульсы с фоторезистора преобразовывались в блоке формирования импульсов 10 в меандр, который поступал на частотный детектор 11. Флуктуации выходного напряжения частотного детектора соответствовали флуктуациям угловой скорости активатора, следовательно, и флуктуациям средней скорости потока жидкости у поверхности электродов. В качестве предварительного усилителя 12 был использован тот же измерительный усилитель, что и в предыдущих

экспериментах. Анализ спектра выходного напряжения частотного детектора и напряжения электродного датчика производился спектроанализатором 13. Точность измерения спектральных составляющих не хуже 5 %. При скорости вращения активатора 300 об/мин скорость движения жидкости вблизи поверхности электродов составляла около 2,7 м/с. Концентрация электролита 2,9 г/л.

Спектр пульсаций скорости жидкости в относительном масштабе, рассчитанный по измеренному спектру флуктуаций выходного напряжения частотного детектора показан на рисунке 3.7. Он выявил неравномерность вращения активатора. Спектр имеет пики на частотах 2,9 Гц и 5,1 Гц, а также на кратных им частотах. Первая из них соответствует частоте вращения резинового пассика, вторая - частоте вращения активатора. Таким образом, скорость потока жидкости была не постоянна, а имела периодические негармонические пульсации с частотами около 3 Гц и 5 Гц, вызванные неточностью изготовления вращающихся частей установки. Оказалось, что спектр напряжения, снимаемого с электродов из тантала (рисунок 3.6), имеет такую же гребенчатую структуру, как и спектр пульсаций скорости (рисунок 3.7). Различия в амплитудах пиков спектральных характеристик можно объяснить эксцентриситетом активатора и неперпендикулярностью его плоскости к оси вращения, что создает радиальные и вертикальные пульсации скорости и приводит к подчеркиванию частот 5, 10 и 15 Гц в спектре напряжения, снимаемого с электродов. При этом в полосе 3...10 Гц напряжения, снимаемые одновременно с двух разных пар электродов, расположенных диаметрально противоположно, коррелированы с коэффициентом корреляции 0,87. А электродное напряжение имеет коэффициент корреляции 0,71 с переменной составляющей выходного напряжения частотного детектора. Тем самым доказано, что именно пульсация скорости жидкости определяет величину и спектр электродного напряжения. На рисунке 3.8 показана спектральная характеристика электродного напряжения в диапазоне частот от 20 до 200 Гц при вращении активатора (1) и при отсутствии вращения, но включенном электродном двигателе (при снятом пассике) (2). Из рисунка 3.8 видно, что при движении

жидкости величина электродного шума на частотах ниже 80 Гц существенно превышает его значение

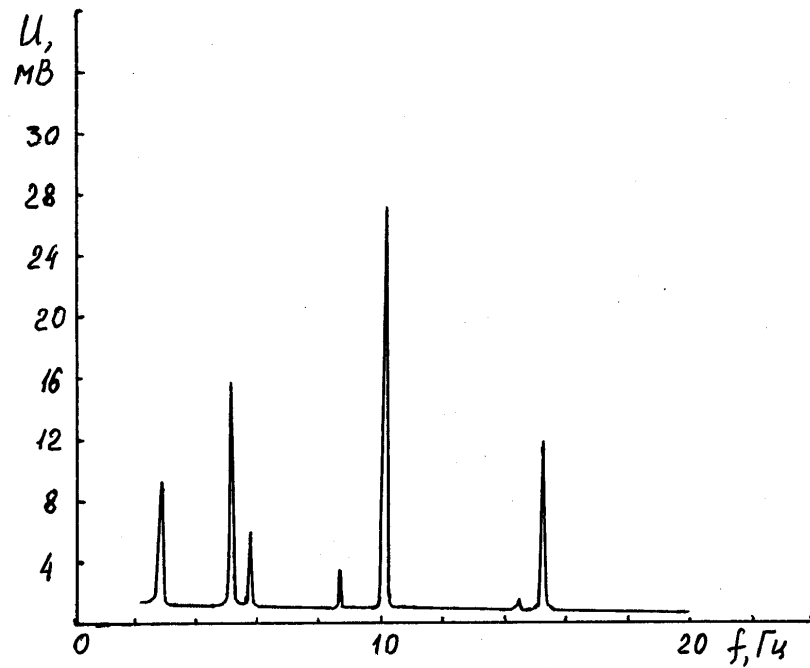


Рисунок 3.6 - Спектр напряжения на танталовых электродах

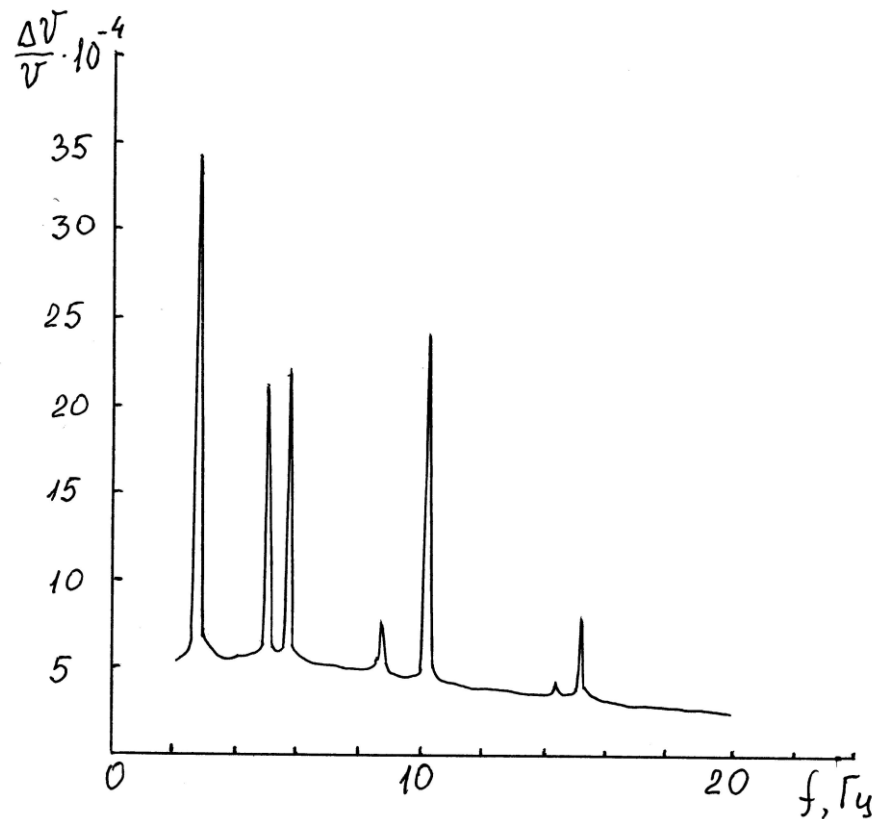


Рисунок 3.7 - Спектр пульсаций скорости потока жидкости

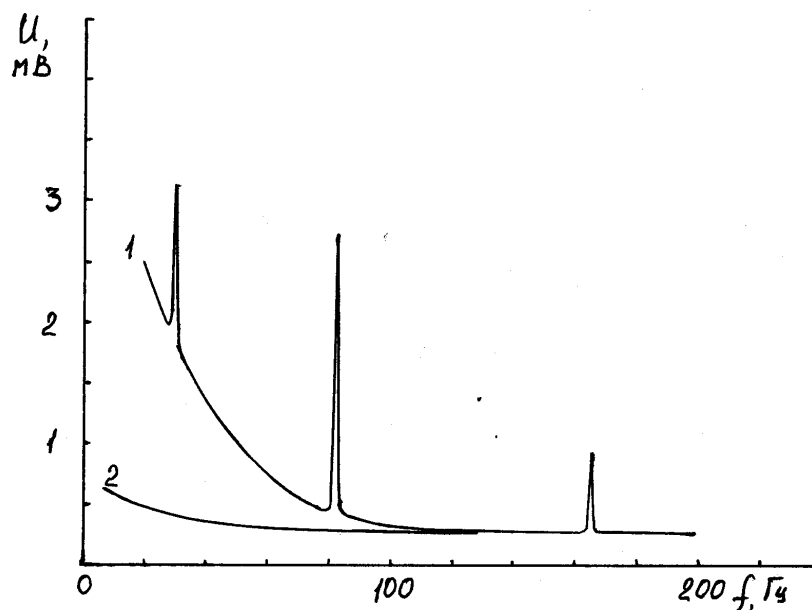


Рисунок 3.8 - Спектр напряжения на электродах из тантала. 1 –  $V=2,7$  м/с, 2 –  $V=0$

в отсутствие движения. Спектральная плотность шума пропорциональна  $f^{-\alpha}$ , где  $\alpha \approx 1,25$ . На более высоких частотах собственный шум измерительного тракта, имевший в диапазоне 100...200 Гц значение 0,25 мВ, не позволил выполнить точные измерения. Кроме того, на рисунке 2.11 наблюдается пик на частоте 82 Гц, соответствующий частоте прохождения ребер активатора (их было 16) возле электродов. При измерениях не отмечено существенной разницы в электродном напряжении у датчиков из тантала и нержавеющей стали. На спектральных характеристиках по оси ординат отложены значения напряжения в одном частотном канале спектроанализатора, полоса пропускания которого для диапазона 200 Гц составляла 1,1 Гц, а для диапазона 20 Гц - 0,11 Гц. В промежутках между пиками спектральную плотность электродного напряжения можно определить по формуле  $\sigma = U / K \sqrt{\Delta f}$ , где  $U$  - ордината спектральной характеристики,  $K$  - коэффициент усиления предварительного усилителя,  $K = 50000$ ,  $\Delta f$  - полоса пропускания частотного канала спектроанализатора. Понятие спектральной плотности не имеет смысла для периодической компоненты, поэтому амплитуда пиков на характерных частотах и есть само значение амплитуды гармоники.

Соотношения между амплитудой пиков спектральной характеристики на разной частоте непостоянны. В частности, они меняются с течением времени вследствие изменения трения в подшипниках и износа пассива, при разборке – сборке ванны для замены электролита и установки новых электродов. Регулировка положения оси электродвигателя позволяла на некоторое время уменьшить вплоть до полного исчезновения на экране спектроанализатора пиков на частоте вращения пассива (2,9 Гц) и ее гармониках. Таким образом, неравномерность вращения вертушки, являющаяся следствием технического несовершенства, неидеальности механической части установки помогла нам установить важную связь электродного шума движения с пульсациями скорости потока жидкости.

Снята зависимость напряжения  $U$  от концентрации  $S$  электролита на частоте 10,2 Гц (второй пик на частоте вращения вертушки). Концентрация  $NaCl$  менялась от 2,9 г/л до 35,5 г/л (с точностью  $\pm 5\%$ ) без разборки ванны при помощи шприца через отверстие в крышке. На рисунке 3.9 показана полученная зависимость в относительном масштабе  $U/U_0$ , аппроксимированная степенной функцией

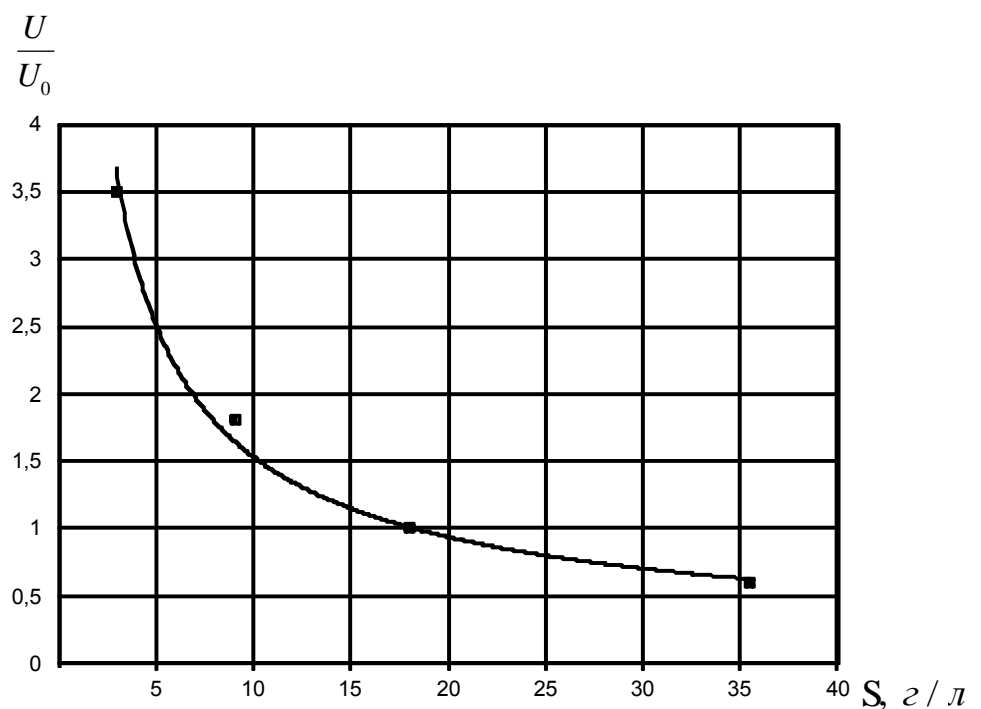


Рисунок 3.9 - Зависимость электродного напряжения на частоте 10,2 Гц от концентрации  $NaCl$  в электролите



ей  $U/U_0 = 7,8S^{-0,71}$ , где  $U_0$  - электродное напряжение при  $S = 18$  г/л. Из нее видно, что напряжение уменьшается с ростом концентрации. Это свидетельствует о том, что измеренное напряжение  $U$  не является наводкой извне, а формируется непосредственно на границе контакта электрода с электролитом.

Представляет интерес выяснение причин общего подъема спектральной характеристики электродного шума на частотах ниже 80 Гц (рисунок 3.8). Можно предположить, что это является следствием турбулизации потока жидкости активатором. В соответствии с теорией о структуре турбулентности, турбулентные вихри, возникающие в жидкости, быстро дробятся на более мелкие, при этом спектр пульсаций скорости имеет характер  $1/f^\alpha$  [53; 86] (Рейнольдс, Монин). Это мы наблюдаем и на рисунке 3.8. Поставлен простой эксперимент по выяснению влияния турбулизации потока жидкости на электродный шум. В ванне лабораторной установки (рисунок 3.5) располагались два цилиндрических танталовых электрода диаметром 6 мм, перед которыми была установлена поворотная преграда с сечением в виде вытянутого овала (рисунок 3.10). Измерение электродного шума проводилось спектроанализатором на частоте 7 Гц для параллельной и перпендикулярной ориентации большой оси овала относительно вектора скорости потока (он перпендикулярен к линии, соединяющей оси электродов) при средней

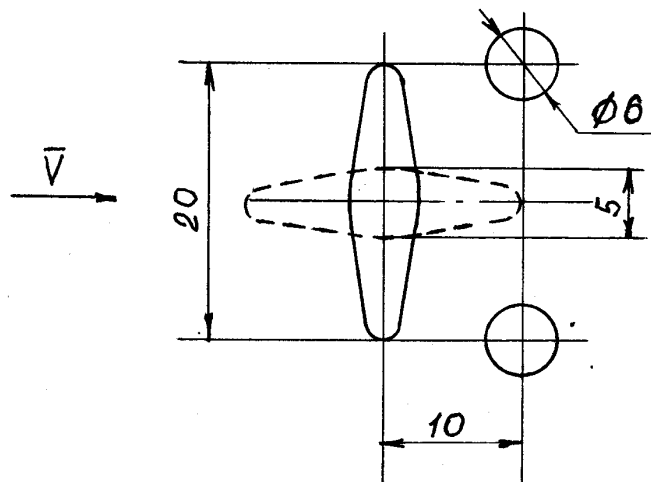


Рисунок 3.10 - Схема расположения электродов и поворотной преграды на крышке ванны

скорости потока 1,7 м/с, а также в отсутствие движения. На рисунке 3.11 показаны аппроксимированные степенной функцией зависимости спектральной плотности электродного шума от времени выдержки при турбулентном течении жидкости. Кривая 1 соответствует перпендикулярной, а кривая 2 – продольной ориентации большой оси овала относительно вектора скорости потока. Кривая 3 соответствует отсутствию движения ( $V = 0$ ). По оси ординат отложено отношение  $U/U_0$ , нормированное к значению напряжения  $U_0$ , измеренному при отсутствии движения после 8 суток выдержки в электролите.

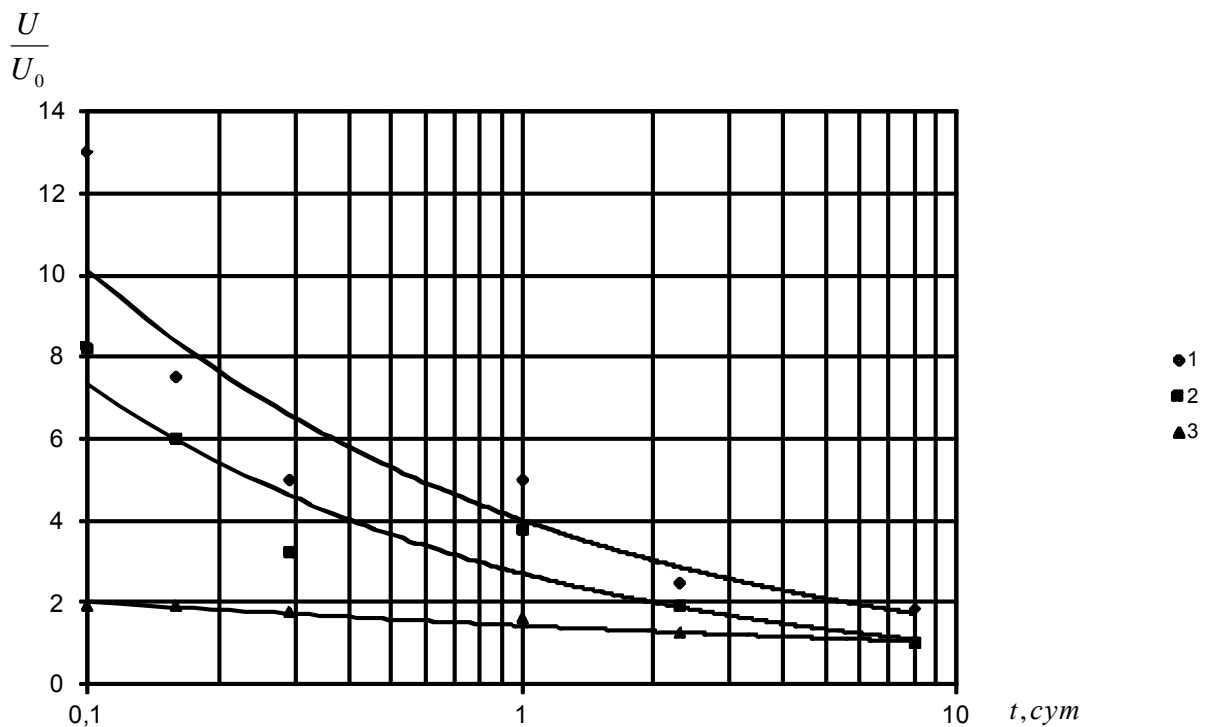


Рисунок 3.11 - Зависимость спектральной плотности электродного шума от времени выдержки при турбулентном течении жидкости. 1 – перпендикулярная, а 2 – параллельная ориентация большой оси овала относительно вектора скорости потока. 3 – электродный шум при отсутствии движения жидкости

Однако следует заметить, что в измеренном при скорости  $V=0$  напряжении между электродами значительную часть составлял собственный шум измерительного усилителя, поскольку электродный шум был слишком мал. Как показал эксперимент, шумовое напряжение между электродами в первые часы и даже дни

после замачивания при скорости  $V = 1,7$  м/с существенно превышало его значение при  $V = 0$ . С течением времени шумовое напряжение как при  $V = 0$ , так и при  $V = 1,7$  м/с уменьшалось, однако напряжение при перпендикулярной ориентации большой оси овала относительно вектора скорости (кривая 1) оставалось в 1,4 - 1,8 раз большим, чем при параллельной ориентации (кривая 2). Спустя неделю шумовое напряжение при ориентации большой оси овала параллельно вектору скорости (минимальная турбулизация) мало отличалось от его значения при  $V = 0$ . При поперечном положении преграды (максимальная турбулизация) шумовое напряжение возрастало на 80%. Тем самым доказана роль турбулентности в формировании шума движения. Зависимость уровня шума от времени выдержки электродов в электролите показывает, как снижается доля коррозионного и адсорбционного шума и еще раз свидетельствует о том, что наблюдаемый шум не связан с магнитогидродинамическими явлениями. Разброс отмеченных на графиках точек относительно аппроксимирующих кривых можно объяснить изменением состава электролите при его смене, поскольку при этом параметры двойного электрического слоя на поверхности электрода. Вследствие большой продолжительности эксперимента электролит периодически обновлялся, а измерение шума производилось через 0,5...2 часа после его замены.

Представляет интерес вопрос о влиянии площади электродов на величину шума движения. Для выяснения зависимости шума движения от площади электродов проделан следующий эксперимент. Датчик в виде двух дуг (рисунок 3.12), выполненных из отрезков коаксиального высокочастотного кабеля 2 диаметром 8 мм с полиэтиленовой внешней изоляцией, в которые диаметрально противоположно встроены два титановых цилиндрических электрода 1 диаметром 10 мм и длиной 40 мм, расположен в ванне измерительной установки (рисунок 3.5). Края электродов покрыты силиконовым герметиком. Такая конструкция датчика позволила уменьшить эффекты, связанные с турбулизацией на краю электрода набегающего потока жидкости и формированием вязкого подслоя.

Датчик установлен в плоскости, параллельной плоскости активатора. Перед измерениями электроды отполированы и выдержаны в электролите трое су-

ток. Расстояние между электродами по дуге окружности (то есть по траектории движения жидкости) составляет около 0,2 м. Это много больше размеров электродов, следовательно, и размеров создаваемых ими турбулентных вихрей, что позволяет считать флуктуации потенциалов электродов, вызванные обтеканием их поверхности потоком жидкости, некоррелированными. Датчик через малошумящий повышающий трансформатор подключен к измерительному усилителю, с выхода которого шумовое напряжение подается на спектроанализатор. Усилитель, трансформатор и спектроанализатор те же, что использовались в экспериментах раздела 2.1 и 2.2.

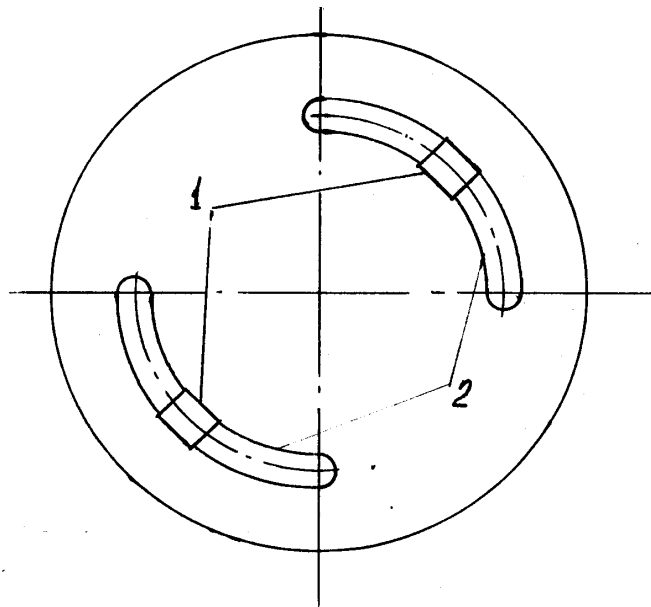


Рисунок 3.12 - Схема датчика при исследовании влияния площади электродов на величину электродного шума

Усредненные измеренные спектры шума датчика в диапазоне 30...200 Гц при исключении спектральных составляющих на частотах, кратных частоте вращения активатора, для трех разных площадей электродов при скорости потока жидкости вблизи электродов  $V$  равной 0; 2,1 м/с, и 3,5 м/с показаны на рисунках 3.13 – 3.15. Уменьшение площади электродов производилось путем покрытия части их поверхности силиконовым герметиком. Коэффициент шума усилителя с

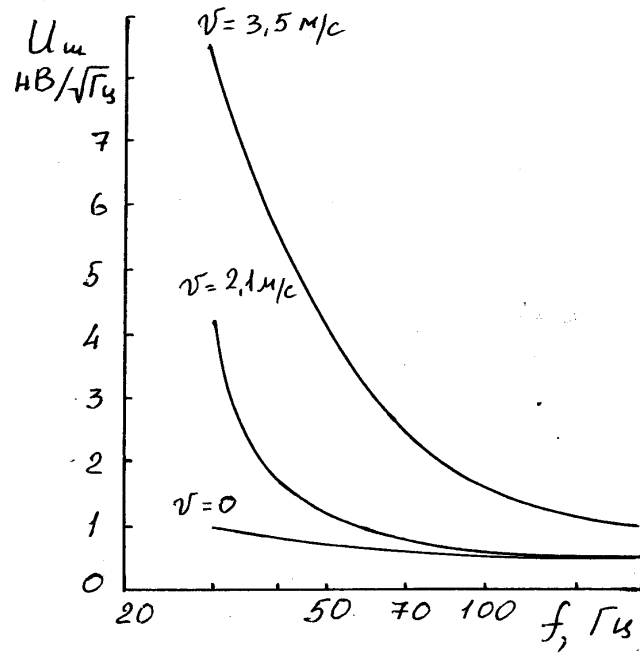


Рисунок 3.13 - Спектр электродного шума при  $S = 12,56$  см<sup>2</sup>

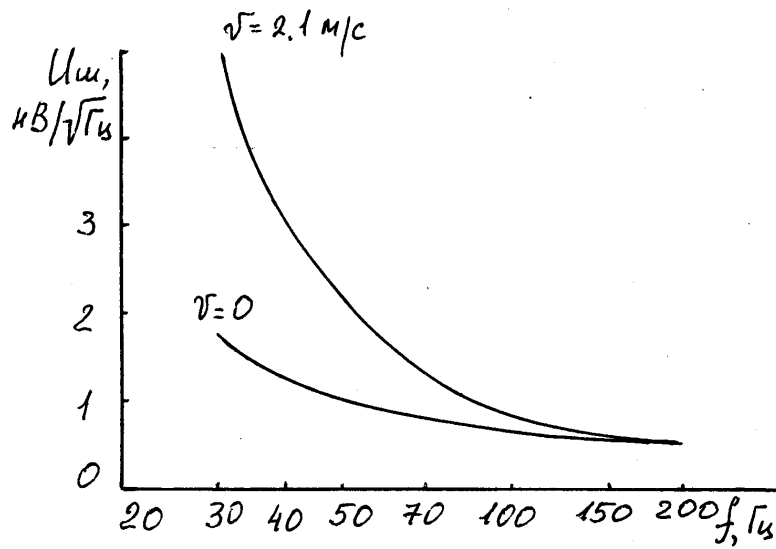


Рисунок 3.14 - Спектр электродного шума при  $S = 6,28$  см<sup>2</sup>

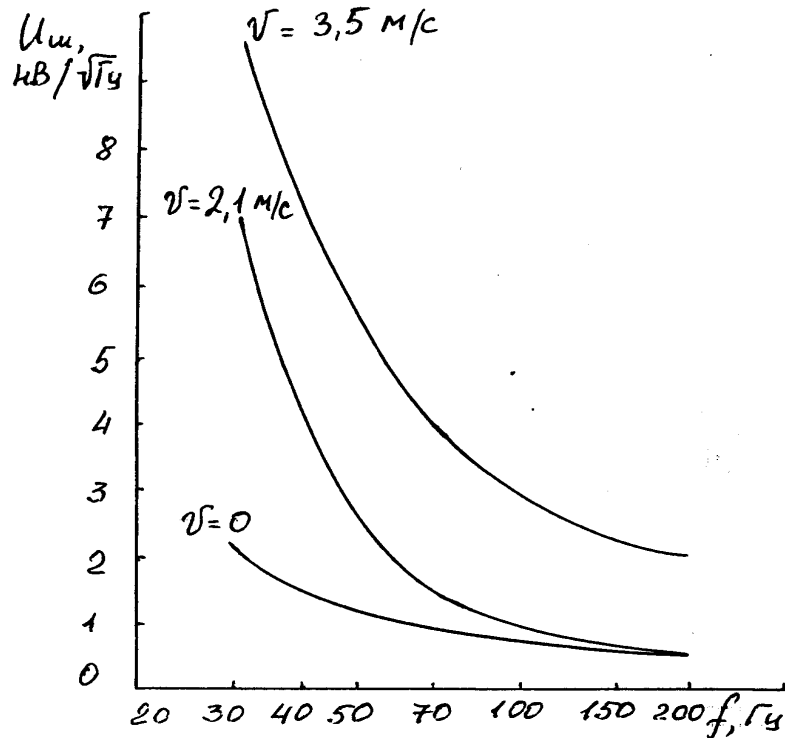


Рисунок 3.15 - Спектр электродного шума при  $S = 3,14 \text{ см}^2$

входным трансформатором находился в пределах 1 дБ на частоте 30 Гц и 1,5 дБ на частоте 200 Гц, поэтому ошибка измерений не превышает 20 %. Анализ измеренных амплитудных спектров позволил выявить следующие закономерности.

При скорости жидкости  $V = 2,1 \text{ м/с}$  шум датчика на частотах выше 90 Гц мало отличается от шума в отсутствие движения. На частотах ниже 90 Гц шум при движении жидкости значительно превышает его значения в отсутствие движения. На частоте 30 Гц это превышение достигало четырех раз. При скорости жидкости  $V = 3,5 \text{ м/с}$  шум датчика существенно превышал его значения в отсутствие движения во всем исследованном диапазоне частот, причем на низших частотах диапазона это превышение достигало порядка. То есть, рост скорости движения жидкости приводил к непропорциональному росту шума датчика, что может быть связано с значительной турбулизацией потока активатором.

С ростом площади электродов спектральная плотность напряжения шума, как при наличии движения, так и при его отсутствии, уменьшается. Увеличение площади электродов в четыре раза при скорости жидкости  $V = 2,1 \text{ м/с}$  приводит к

уменьшению шума датчика примерно в два раза, что согласуется с моделью о некоррелированных источниках шума, равномерно распределенных по поверхности электрода, предложенной в разделе 2.1. Следовательно, закон распределения шума движения должен быть близок к нормальному.

Спектральная плотность шумового напряжения пропорциональна  $f^{-\alpha}$ , где  $\alpha \approx 1$  при  $V = 0$ ,  $\alpha \approx 1,5 \dots 1,8$  при  $V = 2,1$  м/с,  $\alpha \approx 1,1 \dots 1,5$  при  $V = 3,5$  м/с. В отсутствие движения спектр шума соответствует известному из [49; 50] (Hladky, Halford) спектру электрохимического шума. При движении электролита спектральные зависимости шума автор объясняет особенностями турбулизации потока жидкости [85] (Монин). При малых скоростях потока возникают наиболее крупномасштабные вихри, поэтому в спектре пульсаций скорости мало высокочастотных составляющих. С ростом скорости (увеличением числа Рейнольдса, в экспериментах  $Re \approx 10^5$ ) количество мелкомасштабных вихрей возрастает, в спектре пульсаций скорости увеличивается доля высокочастотных составляющих. При этом, поскольку рост скорости приводит к увеличению энергии вихрей, наблюдается рост всех спектральных составляющих. Полученные в эксперименте значения  $\alpha$  близки к значениям  $\alpha \approx 1,6$ , полученным в эксперименте с другими электродами на этой же установке (рисунок 3.3) при одинаковой скорости жидкости  $V \approx 2$  м/с. Это свидетельствует о том, что турбулентность потока обусловлена, в основном, самой ванной и активатором, а не наличием преграды в виде электродов. Лишь при  $S = 3,14$  см<sup>2</sup> индекс  $\alpha$  имеет несколько меньшее значение. В соответствии с [32] (Мальцев) при меньшей площади электродов усреднение мелкомасштабных турбулентных вихрей происходит в меньшей степени, поэтому и спектр должен в меньшей степени зависеть от частоты. Следует заметить, что величина электродного шума движения связана с пульсациями скорости, следовательно и со структурой турбулентности, в приэлектродном слое. Приэлектродный слой характеризуется в десятки раз большим значением вязкости жидкости, чем вдали от электрода [53; 55] (Рейнольдс, Духин). При больших числах Рейнольдса, так называемая, инерциальная область частот, в которой силы инерции пре-

восходят силы внутреннего трения в жидкости, может оказаться ниже диапазона частот, в котором проводились измерения. Но за пределами инерциальной области значения спектрального индекса для амплитудного спектра скоростей приближаются к значению 1,5 [85] (Монин). Таким образом, гипотеза о турбулентном происхождении электродного шума удовлетворительно объясняет все результаты эксперимента.

### ***3.2. Связь электродного шума с пульсациями скорости и давления жидкости***

Для более точного и детального исследования зависимости шума датчика от пульсаций скорости электролита создана экспериментальная установка, схематично показанная на рисунке 3.16. В стальном ящике 1, являющемся магнито- и электростатическим экраном, расположены второй стальной ящик-экран 2, установленный на его крышке электродвигатель 3, аккумулятор 4 питания электродвигателя и блок 5 для регулирования скорости вращения электродвигателя, представляющий собой магазин переключаемых гасящих сопротивлений. В ящике 2 расположен центробежный насос 6, соединенный с электродвигателем 3 диэлектрическим валом 7, проходящим сквозь отверстие в крышке ящика 2. Насос приводит в движение жидкость, в качестве которой использован водный раствор NaCl, имитирующий морскую воду. Также в ящике 2 расположена ячейка 8 с двумя имитирующими датчик электродами, предварительный усилитель 9 с собственным источником питания, резервуар 10 с жидкостью, датчик 11 скорости жидкости и его предварительный усилитель 12 с собственным источником питания. По гибкому диэлектрическому трубопроводу 13 диаметром 3,5 мм жидкость через датчик скорости поступает от насоса в ячейку с электродами, а из нее в резервуар 10. Насос специально доработан, чтобы увеличить пульсацию скорости жидкости. С целью уменьшения электрических помех, создаваемых коллекторным электродвигателем постоянного тока, последний расположен снаружи ящика 2, при этом электродвигатель и насос объединены в единый блок с помощью отрезка 14 металлической трубы, которая также служит электро-



статическим экраном. Скорость жидкости, как правило, составляет 0,5 м/с, однако в зависимости от степени разряженности аккумулятора может несколько отличаться от указанного значения. Для определения уровня помех от электродвигателя трубопровод имеет отрезок 15, шунтирующий ячейку с электродами, который при измерениях электродного напряжения перекрывался (кроме тех случаев, о которых сказано иное) зажимом 16. Выходы предварительных усилителей 9 и 12 через коммутатор 17 подключены ко входу измерительного усилителя 18, с выхода которого исследуемое напряжение поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 19, выход последнего подключен к компьютеру 20.

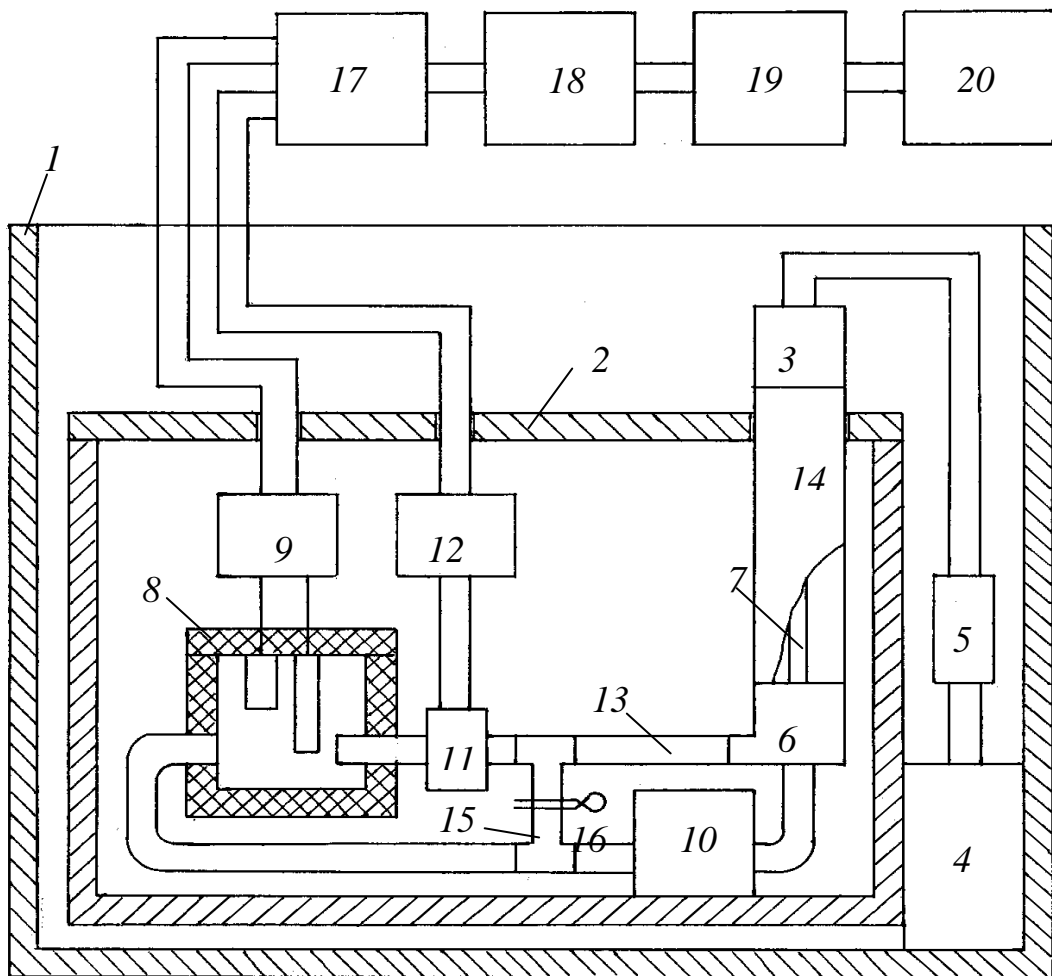


Рисунок 3.16 - Схема установки для измерения электродного шума при пульсациях скорости жидкости

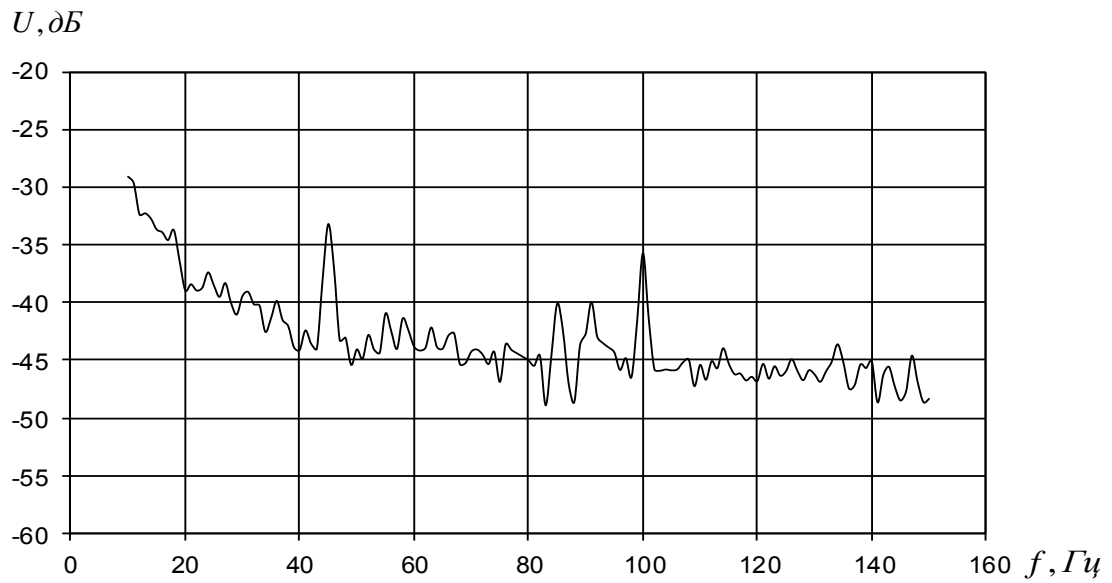
При измерениях с помощью АЦП E20-10 на компьютер сериями по 20 реализаций секундной длительности записывались напряжения с электродов и датчика скорости, которые обрабатывались с помощью программы LGraph 2. Полученные в результате обработки спектры электродного шума и спектры напряжения с датчика скорости жидкости усреднялись по ансамблю. Все приведенные на рисунках 3.17-3.22 спектры построены в логарифмическом масштабе по отношению к  $1 \text{ В} / \sqrt{\text{Гц}}$ . При построении спектров электродного шума учитывалось изменение коэффициента передачи напряжения с электродов на предварительный усилитель, обусловленное влиянием сопротивления и емкости электродного датчика. Для контроля пульсаций скорости жидкости изготовлен фотоэлектрический датчик 11 [78]. Непрозрачный флажок из нержавеющей стали на плоской пружине установлен в прозрачном отрезке трубопровода, с одной стороны которого расположен светоизлучательный диод, а с другой стороны – фотоприемник (фотодиод). Непрозрачный флажок частично перекрывает световой поток от излучателя к фотоприемнику. Под действием потока жидкости пружина изгибается, световой поток модулируется в соответствии с изменением скорости жидкости. Датчик прокалиброван при разной скорости жидкости. Он может служить для определения количественной связи пульсаций скорости и электродного напряжения, однако частотная характеристика датчика в связи с отсутствием технической возможности измерена не была. Возможно также применение нашего датчика скорости жидкости другой конструкции [79].

Электродная ячейка 8 имеет герметично закрытый корпус из оргстекла в форме куба, на противоположных гранях которого установлены впускная и выпускная труба. Измерительный электрод расположен на крышке корпуса так, что его рабочая торцевая поверхность находится на расстоянии 5...10 мм напротив сопла впускной трубы, по которой жидкость подается в ячейку, поэтому скорость потока вблизи электрода можно считать равной скорости его в трубе. Опорный электрод (электрод сравнения) с рабочей торцевой поверхностью диаметром 9 мм расположен в стороне от потока. Рабочая поверхность электродов

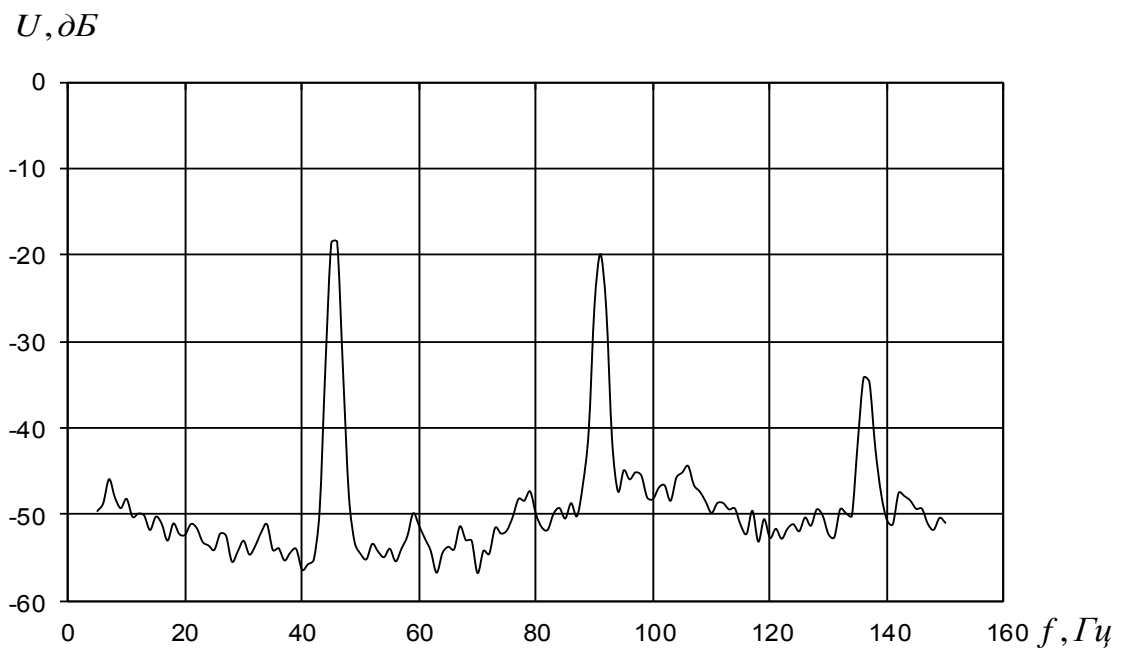
отполирована, нерабочая боковая поверхность изолирована от жидкости краской. Впускная и выпускная труба ячейки выполнены из нержавеющей стали. Электроды подключены к специально разработанному бестрансформаторному предварительному усилителю 9 с низким уровнем шума. В экспериментах применялись два предварительных усилителя в зависимости от площади измерительного электрода, поскольку, как показано в главе 2, соответственно площади изменялось сопротивление электродного датчика, которое к тому же зависит от частоты [65]. Входное сопротивление предварительного усилителя на большей части рабочего диапазона частот на порядок и более превышало модуль полного сопротивления датчика, а его коэффициент шума во всех измерениях составлял не более 2 дБ.

Выполненные измерения показали, что переменная составляющая электродного напряжения (электродный шум) при включенном насосе содержит периодическую составляющую, частота которой определяется скоростью вращения электромотора насоса. Рост скорости вращения приводит к соответственному увеличению частоты периодической составляющей. На рис. 3.17 приведены усредненные спектры электродного шума (рисунок 3.17а), и напряжения датчика скорости (рисунок 3.17б) при скорости движения жидкости 0,5 м/с и времени выдержки электродов в электролите (раствор NaCl с концентрацией 4,5 г/л) 17 суток. Электроды: измерительный электрод из нержавеющей стали 12Х18Н10Т диаметром 2,5 мм, электрод сравнения (опорный) – тоже из нержавеющей стали 12Х18Н10Т диаметром 9 мм. Коэффициент усиления всего измерительного тракта, включая предварительный усилитель, равен  $8,75 \cdot 10^5$ .

Спектральные характеристики напряжения с датчика скорости имеют гребенчатую структуру с пиками на гармониках частоты пульсации скорости. Спектры напряжения электродного шума имеют пики на тех же частотах. На частоте первой гармоники (46 Гц) спектральная плотность электродного шума на 10 дБ превышает уровень фонового шума.



а)



б)

Рисунок 3.17 - Спектры электродного напряжения (а) и напряжения датчика скорости (б) при скорости движения жидкости 0,5 м/с и времени выдержки электродов в электролите (раствор NaCl с концентрацией 4,5 г/л) 17 суток

Изменение частоты первой гармоники происходит ровно во столько же раз, во сколько изменяется скорость движения жидкости. Пик на частоте 85 Гц вызван проникновением помехи неизвестного происхождения, а пик на частоте 100 Гц обусловлен помехой на второй гармонике промышленной частоты. С помощью датчика скорости выполнена оценка относительной величины пульсации скорости движения жидкости. Как на первой, так и на второй гармонике она составляла 0,4%. Чувствительность датчика скорости по результатам его калибровки составляет  $7,4 \frac{В}{м/с}$ . Абсолютная величина пульсации скорости на первой гармонике составляет 0,02 м/с. При столь небольших пульсациях скорости датчик можно считать линейным, то есть пульсация электродного напряжения пропорциональна пульсации скорости.

Выполнено экспериментальное исследование влияния различных факторов на электродный шум. Рассмотрим их по отдельности.

*а). Время выдержки электродов в электролите*

Электролит - раствор NaCl с концентрацией 4,5 г/л. Измерительный электрод из нержавеющей стали 12Х18Н10Т диаметром 2,5 мм. Скорость потока жидкости – 0,5 м/с. Коэффициент усиления измерительного тракта равен  $8,75 \cdot 10^5$ . На рисунке 3.18 приведены спектры электродного шума после выдержки в электролите в течение одних, двух и 17 суток, а также в отсутствие движения жидкости после выдержки в электролите в течение 17 суток. Установлено, что с течением времени величина пика спектральной характеристики электродного шума на первой гармонике пульсации скорости падает. Если через сутки выдержки этот пик составлял -26,5 дБ, то через двое суток – уже -29,8 дБ, а через 17 суток -33,2 дБ. Итого, за время измерений высота пика спектральной характеристики уменьшилась на 6,7 дБ. При этом фоновое значение электродного шума (в промежутках между пиками) тоже уменьшилось. Уменьшение составило от 22 дБ на частоте 10 Гц до 5...6 дБ на частотах 60...100 Гц. На частотах выше 120 Гц

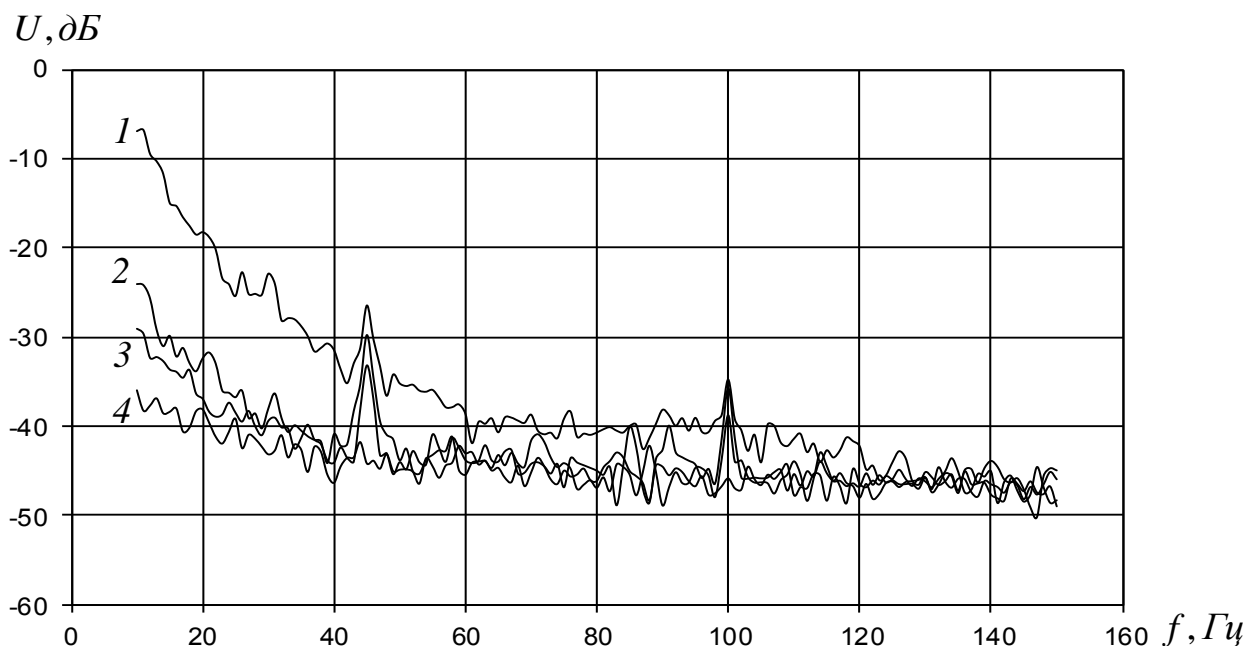


Рисунок 3.18 - Спектры электродного шума после выдержки в электролите с концентрацией 4,5 г/л в течение одних (1), двух (2) и 17 суток (3) при скорости жидкости 0,5 м/с. В отсутствие движения жидкости - (4)

движение жидкости не сказывается на величине электродного шума. Превышение пика спектральной характеристики над фоновым шумом достигает 10...12 дБ.

#### *б). Концентрация электролита*

На рисунке 3.19 показаны спектры электродного шума при концентрации NaCl 4,5 г/л и 27 г/л. Измерительный электрод из нержавеющей стали 12Х18Н10Т диаметром 2,5 мм. Скорость потока жидкости – 0,5 м/с. Время выдержки в электролите - 17 суток. Коэффициент усиления измерительного тракта равен  $8,75 \cdot 10^5$ . Измерение спектра произведено сначала при концентрации 4,5 г/л. Затем часть электролита в резервуаре 10 была заменена на электролит с более высокой концентрацией и включен насос. Спустя несколько минут после перемешивания электролита, выполнено второе измерение спектра. Увеличение

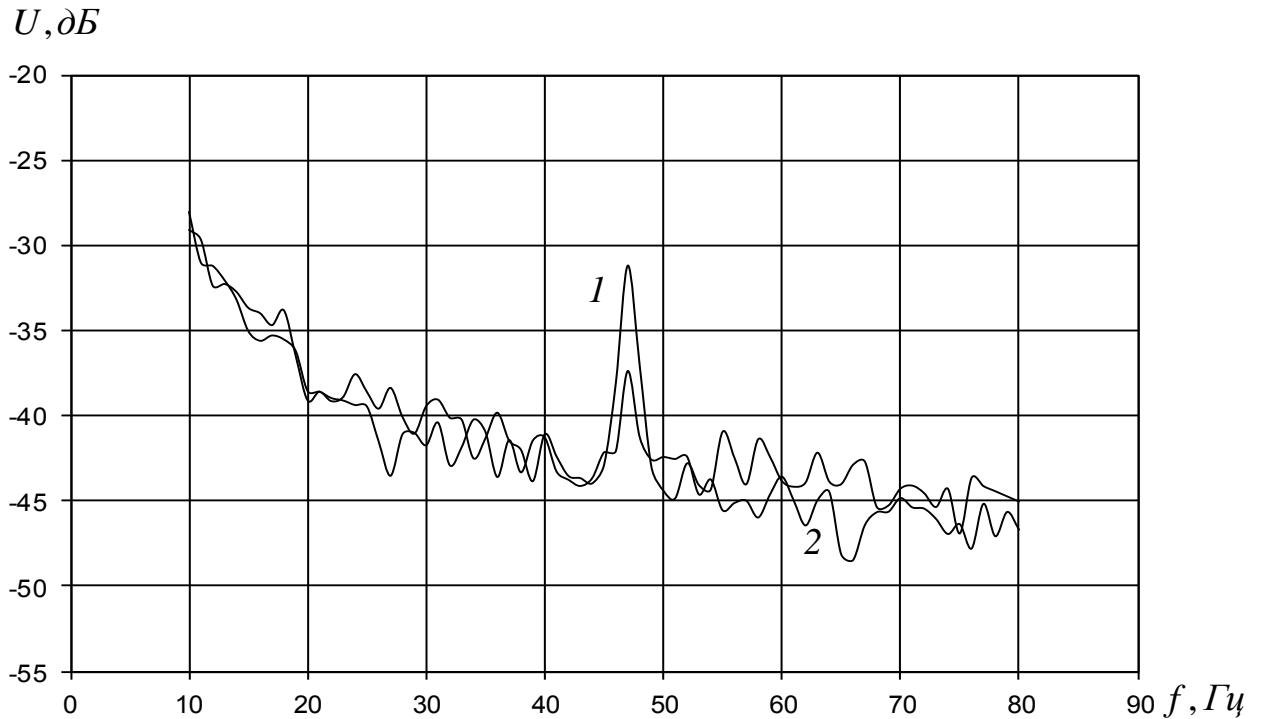


Рисунок 3.19 - Спектры электродного шума при концентрации NaCl 4,5 г/л (1) и 27 г/л (2)

концентрации в 6 раз привело к уменьшению пика спектральной характеристики на первой гармонике пульсации скорости на 6,2 дБ, что близко к полученному в разделе 3.1 (рисунок 3.9). Фоновое значение электродного шума несколько уменьшилось только на частотах выше 50 Гц. Это уменьшение, составившее около 2 дБ на частоте 60 Гц, по-видимому, обусловлено уменьшением активной части импеданса электродной ячейки и соответствующим уменьшением теплового шума.

#### *в). Площадь измерительного электрода*

Для выяснения зависимости флуктуаций электродного напряжения от площади измерительного электрода применен блок из четырех изолированных друг от друга одинаковых электродов (секций) из титана и одного электрода из нержавеющей стали. Все электроды представляли собой полированные торцы

проволоки диаметром 1 мм, так что площадь электрода составляла  $0,78 \text{ мм}^2$ . Электроды выдержаны в электролите (раствор NaCl с концентрацией 4,5 г/л) 9 суток. Увеличение площади измерительного титанового электрода производилось путем параллельного соединения секций. На рисунке 3.20 приведены спектры электродного шума при разной площади измерительного электрода из титана. Скорость потока жидкости – 0,5 м/с. Коэффициент усиления в измерительном тракте составил  $7,5 \cdot 10^5$ . Спектральная плотность фонового электродного шума при увеличении площади в 4 раза уменьшилась примерно на 6 дБ. При этом величина пика спектральной характеристики электродного напряжения на первой гармонике пульсации скорости стала на 2 дБ ниже. Как показали и другие измерения, влияние площади электрода на величину пика спектральной характеристики существенно меньше, чем на величину фонового шума. Превышение пика над фоновым шумом увеличилось и достигло 15 дБ.

*г). Материал измерительного электрода*

На рисунке 3.21 показаны спектры электродного шума для электродов из титана и нержавеющей стали. Электроды диаметром 1 мм ( те же, что в предыдущем пункте) после выдержки в электролите соленостью 4,5 г/л в течение 8 суток. Скорость жидкости – 0,55 м/с. Коэффициент усиления в измерительном тракте -  $7,5 \cdot 10^5$ . У стального электрода пик на первой гармонике пульсации скорости составил -31,5 дБ, превышение над фоном 8,5 дБ. У титанового электрода соответственно пик составил -35 дБ, превышение над фоном тоже около 8,5 дБ. Следовательно, величина пика у стального электрода больше, чем у титанового, на 3,5 дБ. На столько же выше и фоновое значение электродного шума в диапазоне 30...100 Гц. Следует отметить, что при небольшом времени выдержки фоновый шум велик и маскирует пик спектральной характеристики электродного шума на частоте пульсации скорости.



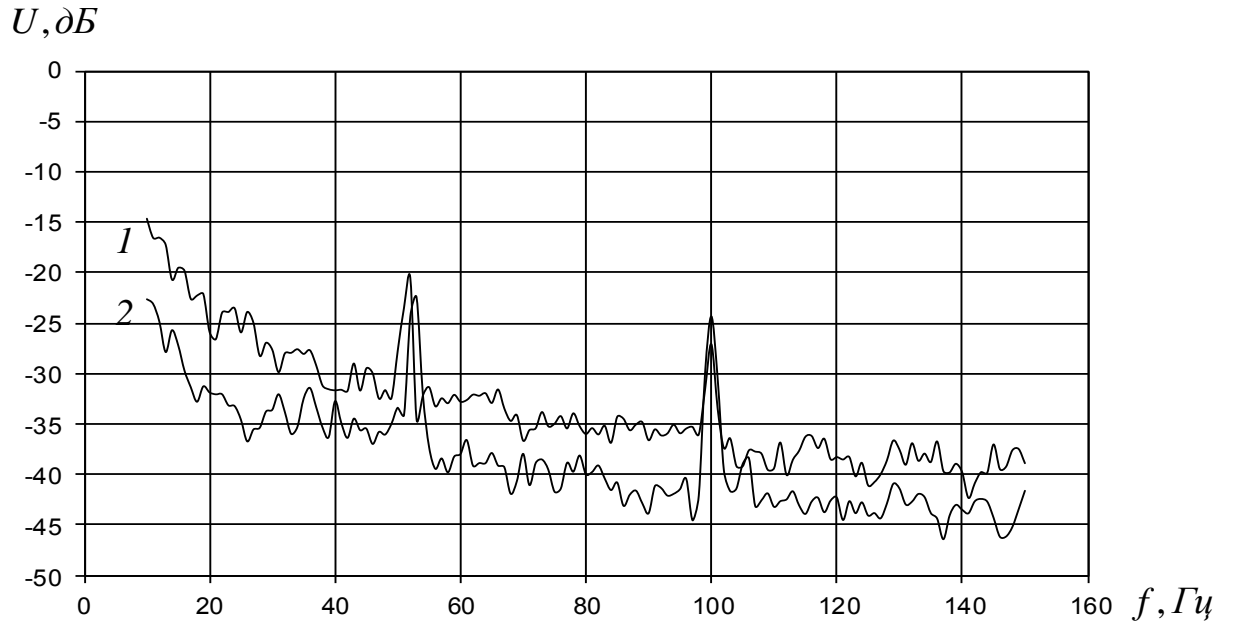


Рисунок 3.20 - Спектры электродного шума электрода из титана при разной площади. 1-  $0,78 \text{ мм}^2$ , 2 –  $3,12 \text{ мм}^2$ . Выдержка в электролите с концентрацией  $4,5 \text{ г/л}$  в течение 9 суток

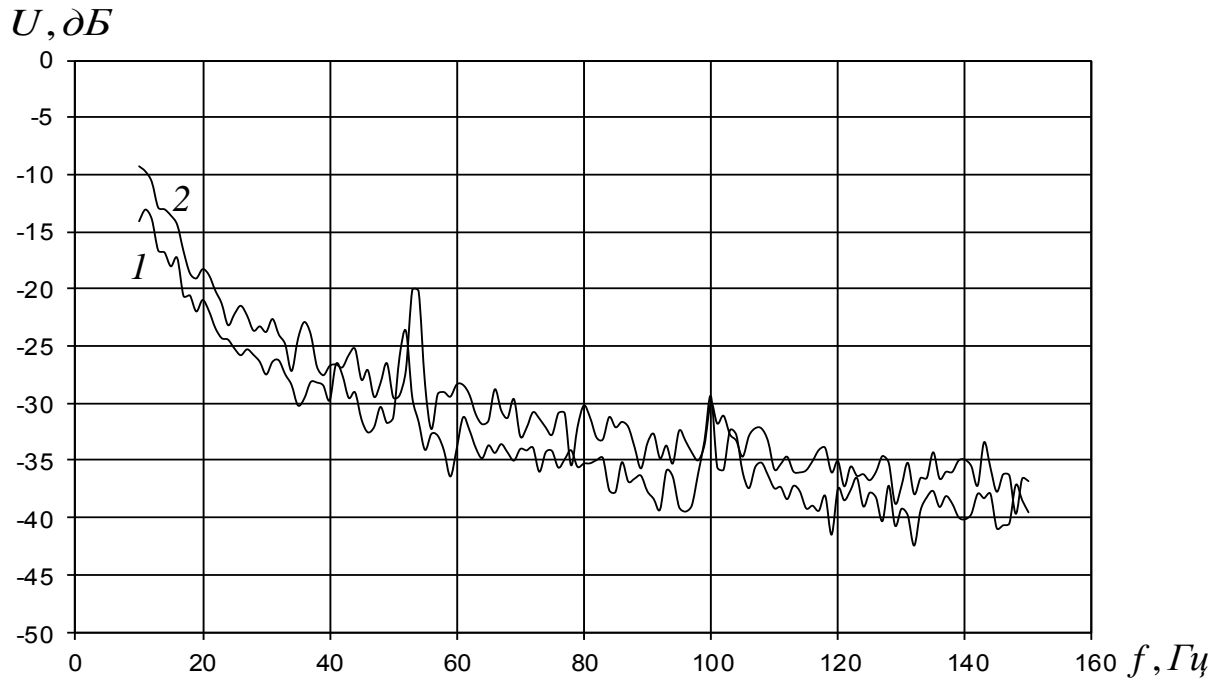


Рисунок 3.21 - Спектры электродного шума электродов из титана (1) и нержавеющей стали (2)

д). *Скорость потока жидкости*

Для адекватной оценки влияния скорости необходимо, чтобы изменение скорости не приводило к изменению частоты пульсаций, так как инерционные свойства электродного датчика неизвестны, частотная характеристика датчика скорости тоже. Уменьшение скорости жидкости без изменения частоты пульсаций выполнено путем открытия шунтирующей трубки 14. Скорость течения в ячейке при этом уменьшилась в 1,2 раза. По сравнению с закрытой шунтирующей трубкой пульсация скорости на первой гармонике уменьшилась в те же 1,2 раза, а пик в спектре электродного шума на первой гармонике пульсации скорости уменьшился примерно в 1.3 раза. Учитывая разброс значений вследствие неодновременности измерений, можно считать, что высота пика электродного напряжения пропорциональна амплитуде пульсации скорости. Тем самым доказано, что датчик скорости в наших измерениях действительно можно считать линейным. В других экспериментах при увеличении скорости жидкости путем увеличения скорости вращения электродвигателя насоса наблюдался рост абсолютной величины пульсации скорости и электродного напряжения. Однако увеличение пика первой гармонике электродного напряжения происходит в меньшей степени, чем рост пульсации скорости. Это дает основания полагать, что процессы, ответственные за потенциал электрода, имеют значительную инерционность. Определим чувствительность электрода к пульсациям скорости. Величина пульсации скорости на первой гармонике составляет 0,02 м/с. Первая гармоника электродного напряжения при этом в пересчете ко входу предварительного усилителя составляет 24 нВ. Это значение по порядку величины совпадает с полученным автором в [76]. Таким образом, чувствительность электрода к пульсации скорости можно оценить величиной  $1,2 \cdot 10^{-6} \frac{В}{м/с}$ .

Инерционность электродных процессов оценим по измерениям пика в спектре электродного шума (рисунок 3.17а) на первой и второй гармониках пульсации скорости. Приведем пик в спектре скорости (рисунок 3.17б) на второй

гармонике пульсации к тому же значению, что и на первой, то есть увеличим на 2 дБ. Соответствующий пик в спектре электродного шума тоже увеличим на 2 дБ. Полагая, что электродный датчик ведет себя как инерционное звено с частотной характеристикой

$$K(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}}, \quad (3.1)$$

где  $f$  - частота,  $\tau$  - постоянная времени, и измеряя величину пика  $U_1$  на частоте  $f_1$  первой гармоники и  $U_2$  (приведенное значение) на частоте  $f_2$  второй гармоники, можно определить величину постоянной времени

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_1} \sqrt{\frac{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - 1}{4 - \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2}}. \quad (3.2)$$

По результатам измерений расчет по (3.2) дает значение  $\tau = 4,4$  мс. Это означает, что механизм возникновения пульсаций электродного напряжения довольно инерционный. Частотная характеристика электродного датчика по отношению к пульсациям скорости жидкости может считаться плоской только на частотах ниже 35 Гц. С уменьшением времени выдержки электродов в электролите происходит увеличение постоянной времени до значений более 10 мс, и частотная характеристика уже не может быть описана формулой (3.1). По-видимому она определяется действием нескольких инерционных процессов.

Рассмотрим подробнее фоновый электродный шум, то есть шум в промежутках между пиками спектральной характеристики электродного шума. В фоновом шуме можно выделить три компонента. Во-первых, это тепловой шум электродного датчика. Во-вторых, это некоррелированные флуктуации потенциала разных участков поверхности электрода, вызванные процессами адсорбции-десорбции ионов кислорода и хлора, ростом окисной пленки, а также активностью локальных гальванических элементов на поверхности электрода, образованных включениями других металлов [36] (Скорчеллетти). Ионы хлора способны

вытеснять с поверхности электрода кислород, при этом потенциал электрода относительно электролита изменяется. При движении жидкости процессы адсорбции-десорбции кислорода и хлора случайным образом сменяют друг друга, что влияет на величину потенциала электрода относительно электролита. В-третьих, это флуктуации потенциала электрода, вызванные мелкомасштабной турбулентностью в потоке жидкости (в частности, турбулентность может образоваться при обтекании самого электрода). При большой площади электрода последняя компонента представляет собой некоррелированные флуктуации потенциала разных участков поверхности электрода. Движение жидкости активизирует электрохимические процессы на поверхности электрода и увеличивает фоновый шум.

После включения насоса наблюдается «выбег» электродного шума, то есть уменьшение спектральной плотности фонового шума более чем на порядок на частотах ниже 50 Гц в течение одной - двух минут. В первые часы выдержки электродов в электролите, а также при включении движения после того, как насос был выключен более часа, фоновое значение электродного шума велико и в некоторой степени маскирует указанные выше пики спектральной характеристики электродного шума, соответствующие пульсациям скорости жидкости. Фоновый шум уменьшается с ростом концентрации электролита и площади электродов [73].

При движении жидкости со скоростью меньше 0,5 м/с фоновый шум, как правило, увеличивается с ростом скорости в диапазоне частот ниже 40 Гц, однако дальнейшее увеличение скорости мало влияет на величину фонового шума, так как скорость электрохимических реакций уже не ограничивается недостатком кислорода у поверхности электрода, а турбулентность при небольшой скорости жидкости не проявляется. Величина фонового шума в значительной степени зависит от времени выдержки датчика в жидкости. Его рост при движении жидкости со скоростью 0,5 м/с для измерительного электрода из нержавеющей стали диаметром 2,5 мм при концентрации электролита 4,5 г/л достигал 27 дБ на частоте 10 Гц и 6 дБ в диапазоне частот 60...100 Гц при суточной выдержке в электролите. На частотах выше 120 Гц рост фонового шума не наблюдался. При выдержке электродов в электролите в течение двух суток рост спектральной плот-

ности фонового шума на частоте 10 Гц достигал 12 дБ по сравнению с отсутствием движения. На частотах выше 50 Гц фоновый шум практически не возрастал. После выдержки электродов в электролите в течение 17 суток электродный шум в отсутствие движения уменьшился на 2...3 дБ. Движение жидкости со скоростью 0,5 м/с увеличивало спектральную плотность электродного шума на 7 дБ на частоте 10 Гц, на частотах выше 40 Гц увеличение шума не отмечено. Таким образом, по мере увеличения выдержки датчика в электролите влияние движения жидкости на его фоновый шум уменьшается и проявляется на более низких частотах. Чувствительность датчика к пульсациям скорости тоже уменьшается, но фоновый шум уменьшается быстрее. Поэтому пик в спектре шумового напряжения датчика, определяющийся пульсацией скорости, становится заметнее.

Турбулентность, создаваемая трубопроводом и датчиком скорости, не оказывает существенного влияния на результаты измерений, поскольку пульсация скорости в промежутках между пиками спектральной характеристики на 30-35 дБ ниже, чем на первой и второй гармониках скорости вращения насоса (рисунок 3.176). В спектре электродного шума величина фонового шума между пиками на 10-20 дБ меньше величины пиков, следовательно влияние турбулентных пульсаций не проявляется. Закон распределения шума (рисунок 3.22) в полосе ниже пика основной гармоники пульсации скорости близок к гауссовскому.

В турбулизованном потоке жидкости вблизи поверхности электродов возникают пульсации давления. В [86] высказано предположение, что электродный шум может быть связан с модуляцией диэлектрической проницаемости в двойном электрическом слое вследствие пульсаций давления при турбулентном движении жидкости. Автором проведено исследование влияния пульсаций давления на электродный шум. Для этого была создана установка, схематично показанная на рисунке 3.23. Диэлектрическая ванна 1, на крышке которой установлены опорный и измерительный электроды 2 и 3, помещена в стальной ящик 4, служащий электростатическим и магнитостатическим экраном. Электроды 2 и 3 установлены в диэлектрических пробках металлической трубы 5, изолированной от электролита слоем нитроокраски. Труба 5 является электростатическим экраном и соединена с

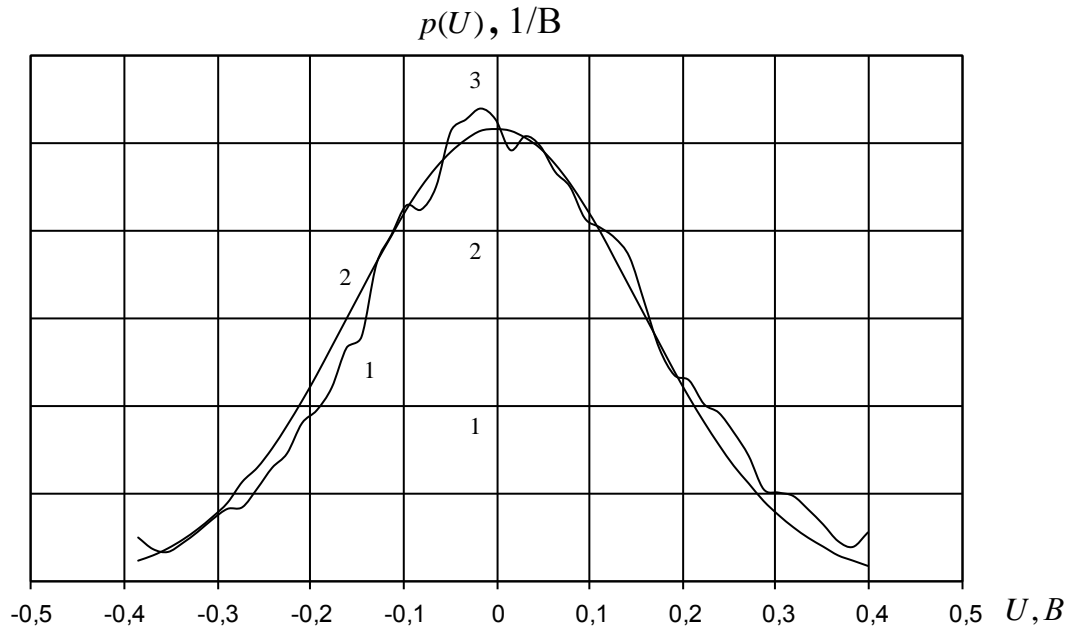


Рисунок 3.22 - Функция распределения плотности вероятности электродного шума измеренная (1) и рассчитанная для нормального закона распределения при той же дисперсии (2)

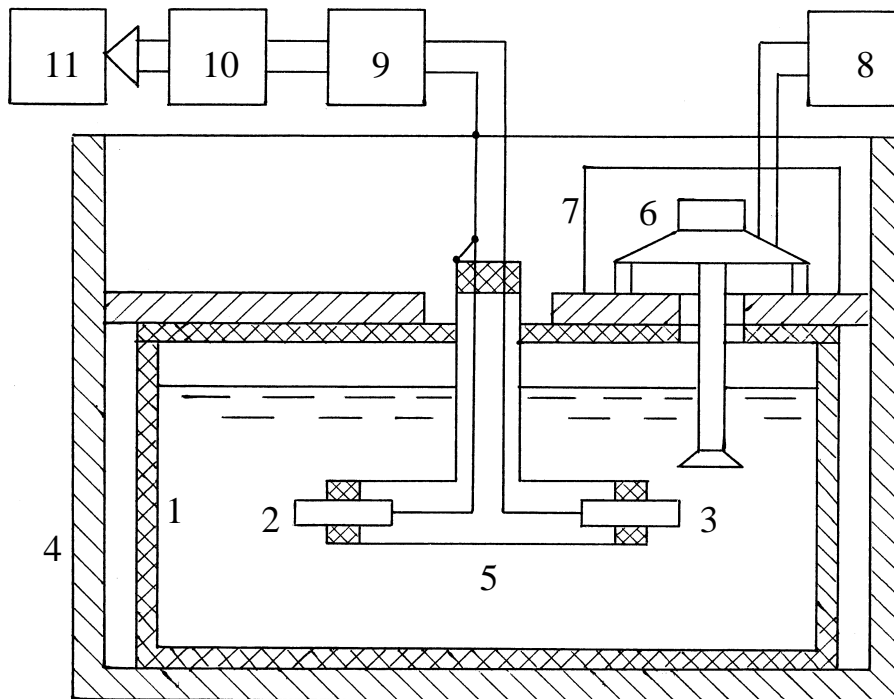


Рисунок 3.23 - Схема установки для исследования влияния пульсаций давления на электродный шум.

общей шиной установки. В ванне вблизи рабочей поверхности одного из электродов возбуждалась звуковая волна. В качестве излучателя 6 применен динамический громкоговоритель 0,25 ГД-19. К его диффузору приклеен легкий диэлектрический шток длиной 160 мм, на конце которого установлен диэлектрический наконечник диаметром 20 мм. Громкоговоритель заключен в магнитостатический экран 7 и установлен над ванной на стальном листе с отверстием, сквозь которое проходит шток с наконечником. Наконечник имеет форму круглого фрагмента сферы, вогнутой стороной обращенной к измерительному электроду, от которой он отстоит на 15 мм. Он и является фактическим источником звуковых колебаний в ванне. К громкоговорителю подводилось переменное напряжение от звукового генератора 8 на частоте 740 Гц, подводимая мощность составила 30 мВт.

С помощью гидроизолированного микрофона ДЭМШ-1а установлено, что амплитуда пульсации звукового давления в месте расположения первого (измерительного) электрода достигала нескольких десятков паскалей. При этом в месте расположения второго (опорного – он соединен с общей шиной) электрода она более чем на порядок ниже. Это позволяет считать, что звук оказывает давление только на поверхность измерительного электрода. Электродное напряжение усиливалось малошумящим усилителем 9, и через амплитудно-цифровой преобразователь 10 подавалось на компьютер 11, где измерялся амплитудный спектр электродного напряжения. Отсутствие электромагнитной наводки на электроды доказано отсутствием в спектре электродного напряжения составляющей на частоте излучения при снятом наконечнике со штока. Измерения показали, что в спектре электродного шума присутствует пик на частоте звукового излучения. Однако применение более жесткой конструкции блока электродов позволило уменьшить этот пик вплоть до полного исчезновения. Увеличение концентрации электролита в 4 раза не оказывало влияния на его величину. Следовательно, воздействие звуковой волны на электроды есть не что иное, как микрофонный эффект электродов, вибрирующих в магнитном поле магнитной системы динамического громко-

говорителя. Таким образом, установлено, что воздействие пульсаций звукового давления на разность потенциалов между электродами отсутствует.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что в общем случае специфический шум движения является суммой нескольких компонент, имеющих собственную физическую природу возникновения. К первой можно отнести коррозионную компоненту. Ко второй - флуктуации потенциала разных участков поверхности электрода, вызванные процессами адсорбции-десорбции ионов кислорода и хлора, ростом окисной пленки, а также активностью локальных гальванических элементов на поверхности электрода, образованных включениями других металлов. Обе эти компоненты проявляют себя и в отсутствие движения, увеличивая собственный шум датчика по сравнению с тепловым. Поэтому сумму этих двух компонент называют иногда избыточным шумом, подчеркивая его нетепловой характер. Избыточный шум в отсутствие движения исследован в главе 2. Коррозионный шум обусловлен процессом окисления (коррозии) электрода. Окисление сопровождается протеканием электрохимических реакций на поверхности электрода и, соответственно, флуктуациями потенциала электрода относительно электролита. Коррозионный шум имеет спектр типа  $f^{-\alpha}$  [49; 50] (Hladky, Halford). Его величина у корродирующих металлов на несколько порядков превышает тепловой шум и зависит от средней скорости движения электрода, поскольку с увеличением скорости к поверхности электрода поступает больше кислорода и окисление идет быстрее. Автором установлено, что по величине коррозионного шума можно определять скорость движения электролита относительно электрода [77]. Устранение коррозионного шума достигается применением химически стойких металлов для изготовления электродов. К ним относятся такие выше перечисленные металлы, как тантал, титан, нержавеющая сталь. Также и процессы адсорбции-десорбции ускоряются при подаче к поверхности электрода свежих порций жидкости. При изменении скорости электролита величина всех спектральных составляющих коррозионного и адсорбционного шума должна меняться одновременно. Результаты наших экспериментов позволяют утверждать,



что коррозионная и адсорбционная компоненты электродного шума могут быть в значительной мере устранены выбором материала электродов и выдержкой их перед началом использования в морской воде. Третья компонента шума движения - это шум, связанный с пульсациями скорости потока. Измеренный спектр электродного шума движения имеет пики на частотах, обусловленных периодически пульсациями скорости жидкости. Электродный шум движения представляет собой пульсации потенциала электрода относительно электролита. Приобретение электродом вследствие его движения некоторого избыточного потенциала относительно электролита по сравнению с равновесным потенциалом, существующим при отсутствии движения, мы называем поляризацией электрода. Причиной поляризации может быть нарушение двойного электрического слоя набегающим потоком электролита (такое предположение высказано в [32] (Мальцев)). Возможна и другая причина пульсаций электродного потенциала в потоке электролита. Поскольку плотная обкладка двойного слоя образована ионами кислорода [37] (Одынец), который в результате диффузии проникает к поверхности электрода, то пульсации скорости жидкости вызывают модуляцию толщины диффузионного слоя и влияют на скорость адсорбции кислорода. У длительно выдержанных в электролите электродов, выполненных из некорродирующих металлов, основной компонентой шума движения датчика является третья компонента. При отрыве газовых пузырьков от поверхности электрода и при отслоении окисной пленки наблюдается шум импульсного характера (взрывной шум). Поскольку механические воздействия на поверхность электродов вызывают шум коррозионного и адсорбционного типа, электроды датчика следует защищать от повреждений.

### ***3.3. Пульсации потенциала металлического электрода, совершающего гармонические колебания в электролите***

Выполнено экспериментальное исследование поляризации электрода, совершающего гармонические колебания в водном электролите. В таких экспериментах достаточно просто контролировать скорость движения электрода по из-

вестной амплитуде и частоте колебаний, выяснить частотную зависимость переменного электродного потенциала, а также установить фазовые соотношения между скоростью и переменным потенциалом электрода, который имеет ту же природу, что и электродный шум движения. Для упрощения контроля параметров движения и анализа полученных результатов электрод приводился в состояние механических колебаний с известной амплитудой  $A$  и частотой  $\omega$ . Скорость

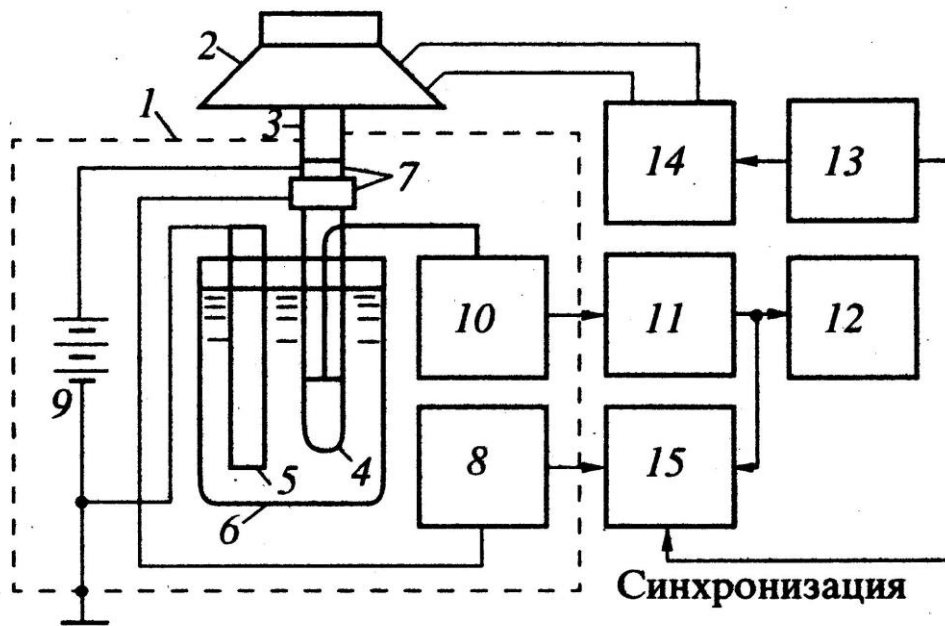


Рисунок 3.24 - Схема установки для исследования поляризации электрода

движения электрода при этом определяется как  $V = \omega A \cos \omega t$ . В экспериментах использована лабораторная установка (рисунок 3.24), содержащая стальной экранирующий корпус 1 с укрепленным на нем динамическим громкоговорителем 2, диффузор которого посредством диэлектрического штока 3 соединен с подвижным исследуемым электродом 4, имеющим форму цилиндра с закругленным концом. Подвижный электрод 4, а также неподвижный 5, располагались в стакане с электролитом 6, при этом нерабочая поверхность неподвижного электрода (в области границы раздела электролит - воздух) изолирована нитрокраской. Подвижный электрод (диаметр 8 мм, общая длина - 22 мм) выполнен из не-

ржавеющей стали X18H9T и отполирован. Неподвижный электрод выполнен в виде цилиндра диаметром 10 мм при длине рабочей части 25 мм. Для уменьшения влияния постоянного магнитного поля на результаты измерений магнитная система громкоговорителя заключена в стальной магнитостатический экран, выполненный в виде чашки, а вся установка размещена внутри второго экранирующего корпуса, выполненного, как и первый, из стали толщиной 10 мм. Установка снабжена также датчиком скорости 7 электрода (рисунок 3.25), состоящим из двух concentрических металлических колец, внутреннее из которых установлено на штоке. Кольца образуют цилиндрический конденсатор, емкость которого

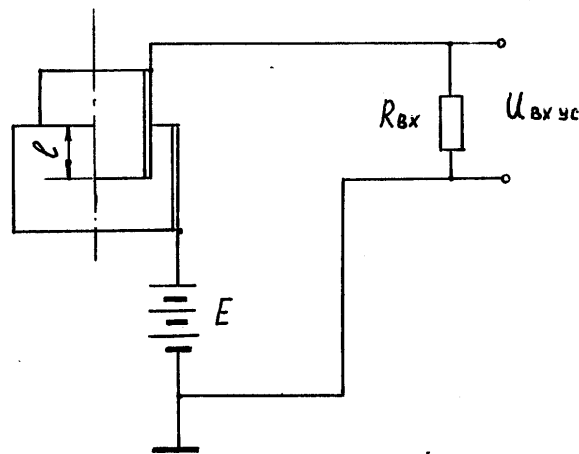


Рисунок 3.25 - Схема датчика скорости движения штока

практически линейно зависит от перемещения штока в пределах единиц миллиметров. Через датчик скорости ко входу усилителя 8 с входным сопротивлением  $R_{BX}$  подключена гальваническая батарея 9. При колебаниях штока 3 изменяется емкость  $C$  цилиндрического конденсатора, возбуждая в его цепи переменный электрический ток  $I = d(CU)/dt$  (здесь  $U$  - напряжение на конденсаторе). Входное сопротивление усилителя 8 выбрано таким, чтобы выполнялось соотношение  $U_{BX} \ll U$ , то есть  $U \cong E$ . В таком случае  $I = E(dC/dt) = kV$ , где  $k$  - коэффициент пропорциональности. Входное напряжение усилителя 8  $U_{BX} = kR_{BX} V$  про-

порционально скорости движения электрода. Усилитель 8 выполнен в виде повторителя напряжения и обладает нулевым фазовым сдвигом и постоянным коэффициентом передачи во всем рабочем диапазоне частот. Подвижный электрод 4 подключен ко входу предварительного усилителя 10, выход которого через измерительный усилитель 11 с режекторным фильтром на частоту 50 Гц подключен к спектралитизатору 12. Динамический громкоговоритель 2 возбуждается от звукового генератора 13 через усилитель мощности 14. Выходы усилителей 8 и 11 подключены ко входам двухлучевого осциллографа 15, вход синхронизации которого соединен со звуковым генератором 13. Установка амплитуды колебаний штока производилась по шкале визуально через лупу с точностью не хуже 10%. Как и всегда, большое внимание уделено достоверности измерений. Предварительный усилитель имел в рабочем диапазоне частот постоянный коэффициент усиления  $K_{ny} = 500$ , несимметричный бестрансформаторный вход при входном сопротивлении 3 кОм, что более чем на порядок превышает модуль импеданса электродной ячейки. Предварительный усилитель построен на 16 параллельно включенных предварительно отобранных транзисторах КТ3107Ж и обеспечивал в эксперименте коэффициент шума не более 2 дБ. Для того чтобы оценить возможный уровень ЭДС электромагнитной индукции при колебаниях гибкого вывода от подвижного электрода в постоянном магнитном поле, все же существующем, несмотря на экранировку в области расположения подвижного электрода, проведен следующий эксперимент. Вместо подвижного электрода на конце штока установили иглу, острие которой припаяли к середине отрезка натянутой проволоки, концы которого соединили с общей шиной (рисунок 3.26). Возбуждаемая при вибрации штока в магнитном поле в правом и левом плече отрезка проволоки ЭДС имеет противоположный по отношению к общей шине знак и с точностью до степени однородности магнитного поля и симметрии используемой конструкции вычитается. В таком случае результат измерения напряжения между иглой и общей шиной отражает величину ЭДС индукции в гибком выводе подвижного электрода. В таблице 3.1 приведены результаты измерения

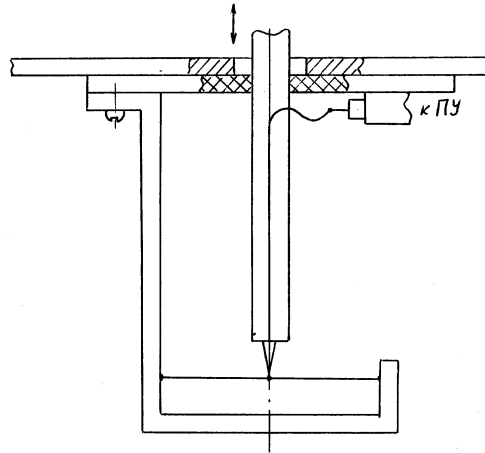


Рисунок 3.26 -- Схема устройства для измерения ЭДС индукции в гибком выводе

Таблица 3.1. ЭДС индукции в гибком выводе подвижного электрода на входе спектроанализатора

$f$ , Гц	17,5	20	25	30	35
$U_{\text{инд}}$ , мВ	24	23	20	21	14

напряжения на выходе усилителя 11. Усилитель 11 имел следующие режимы работы: коэффициент усиления 60 дБ, полоса пропускания 1...100 Гц по уровню -3дБ, режекция 50 Гц включена. Этот режим являлся типовым для последующих измерений, если не оговорены другие параметры. Также в дальнейшем под напряжением  $U_c$  мы подразумеваем напряжение на входе спектранализатора 12, полоса одного частотного канала которого составляла 0,25 Гц. Искажение амплитудно-частотной характеристики усилителя 11 режекторным фильтром учтено.

Указанные в таблице 3.1 значения ЭДС индукции позволяют судить о достоверности измеренного в дальнейших опытах напряжения поляризации  $U_{\text{п}}$  на подвижном электроде. Под напряжением поляризации мы будем понимать переменное напряжение, возникающее по отношению к электролиту на электроде 4, при колебательном движении последнего. Перед измерениями электроды выдерживали в электролите не менее 1 недели. Обнаружена тенденция к постепенному

снижению напряжения  $U_{II}$  по мере выдержки электродов в электролите. Кроме того, наблюдались колебания величины  $U_{II}$  до нескольких раз, связанные с изменением состава электролита (по мере испарения воду доливали до исходного уровня), а также с предварительной механической вибрацией, которая вначале снижала, а при длительной вибрации увеличивала величину  $U_{II}$ , особенно на верхних частотах диапазона. Это явление можно объяснить влиянием вибрации на состояние поверхности электрода, в частности, на процессы адсорбции на поверхности электрода, определяющие параметры двойного электрического слоя, и на структуру окисла, образующегося на поверхности электрода.

При гармонических колебаниях  $x = A \sin \omega t$  электрода 4 выходное напряжение усилителя 8 при постоянной амплитуде  $A$  должно быть прямо пропорционально частоте колебаний  $\omega$ . Для проверки правильности функционирования датчика скорости возбуждались колебания с амплитудой 1 мм. На рисунке 3.27 показана зависимость напряжения датчика скорости (на выходе усилителя 8) от частоты. Точность измерения амплитуды колебаний определяла точность построения графика. Она имеет вид, близкий к проходящей через начало координат прямой линии, что свидетельствует о правильной работе датчика.

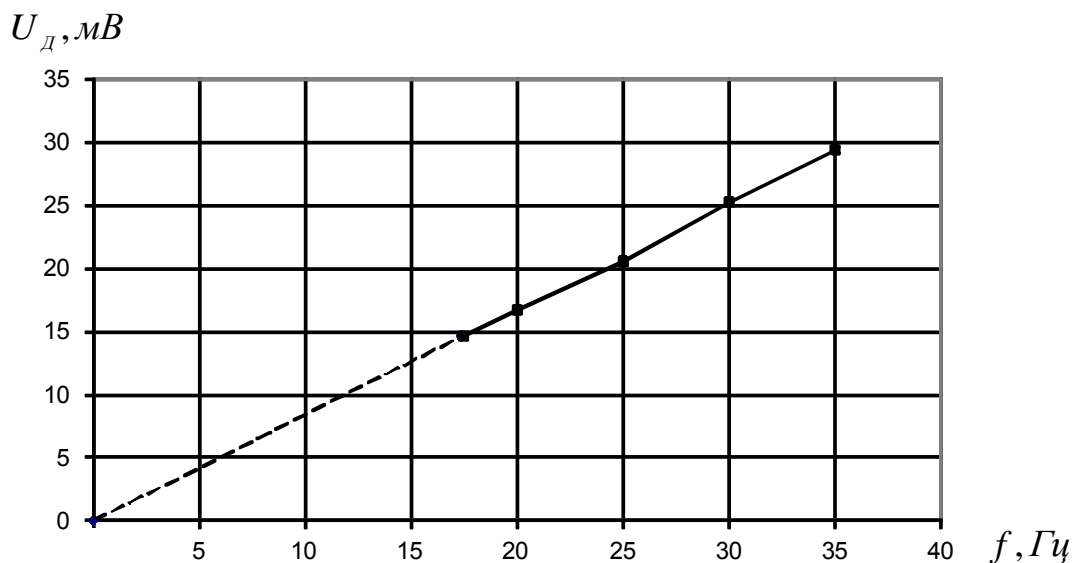


Рисунок 3.27 - Зависимость выходного напряжения датчика скорости от частоты колебаний штока при амплитуде колебаний  $A=1$  мм

В качестве рабочего выбран диапазон частот механических колебаний от 17,5 до 35 Гц, что обусловлено особенностями установки. В частности, необходимость измерения слабых электрических сигналов требует подавления режекторным фильтром сетевой помехи с частотой 50 Гц. Кроме того, на частотах более 35 Гц сильно возрастают механические нагрузки на подвижные части установки, уменьшение же амплитуды колебаний неприемлемо вследствие усложнения визуального контроля амплитуды. Поэтому верхняя граница диапазона составляет 35 Гц. Нижняя граница диапазона обусловлена техническими возможностями используемых в эксперименте генератора, усилителя мощности и динамического громкоговорителя. На рисунке 3.28 представлена зависимость напряжения поляризации  $U_{II}$  от амплитуды колебаний. Измерения производились при концентрации электролита  $S = 10$  г/л на частоте  $f = 35$  Гц. С целью повышения точности и упрощения измерений вместо амплитуды колебаний задавалось напряжение на выходе датчика скорости  $U_{д}$ , которое линейно связано с амплитудой.

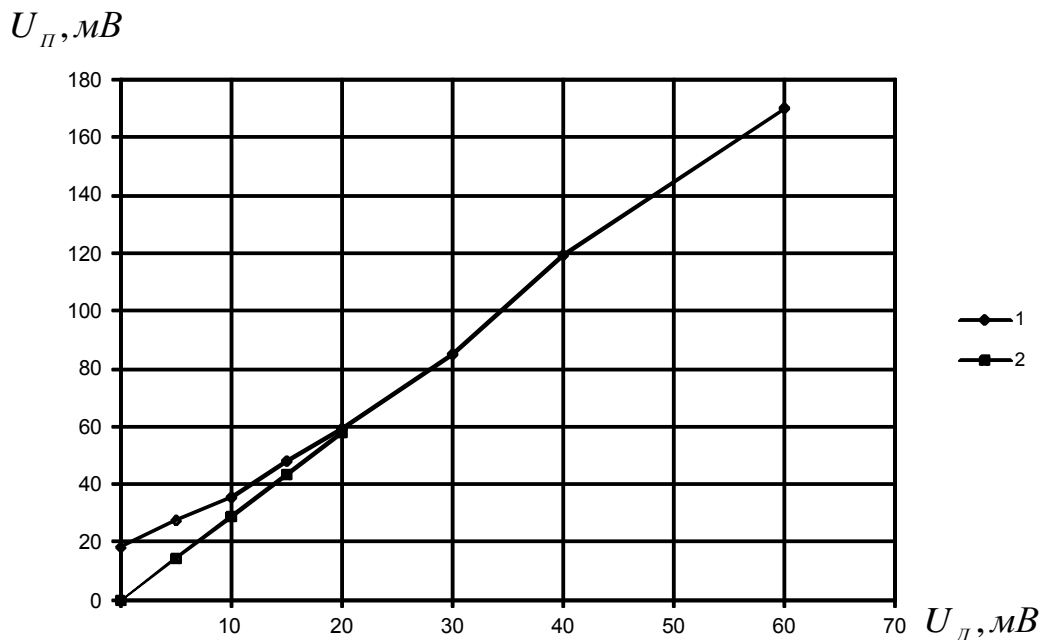


Рисунок 3.28 - Зависимость напряжения поляризации от выходного напряжения датчика скорости при частоте колебаний  $f = 35$  Гц. 1 – измеренные значения напряжения, 2 – после исключения собственного шума измерительного тракта

Возникающее при вибрации подвижного электрода в направлении его оси поляризационное напряжение имело вид зашумленного гармонического колебания с флуктуирующей амплитудой и частотой, равной частоте вибрации. Уровень шума на других частотах не возрастал. Цифрой 1 обозначен график, построенный по измеренным значениям  $U_{\Pi}$ , цифрой 2 - после исключения из измеренного  $U_{\Pi}$  собственного шума измерительного тракта  $U_{\text{изм}}$ , составляющего примерно 18 мВ (значение  $U_c$  при  $U_d = 0$ ), по алгоритму  $\sqrt{U_{\Pi}^2 - U_{\text{изм}}^2}$ . Зависимость  $U_{\Pi}$  от амплитуды колебаний имеет вид прямой линии, проходящей через начало координат. В спектре  $U_{\Pi}$  не наблюдалось увеличения уровня гармоник по сравнению со спектром напряжения возбуждения громкоговорителя, что подтверждает линейность зависимости.

В рабочем диапазоне частот измерен начальный фазовый сдвиг в канале измерения сигнала. Предварительный усилитель в рабочем диапазоне частот имеет нулевой фазовый сдвиг, поэтому можно считать, что фазовый сдвиг в канале измерения сигнала обусловлен только наличием режекторного фильтра в измерительном усилителе 11. Результаты измерения фазового сдвига приведены в таблице 3.2. Также измерен фазовый сдвиг между напряжением поляризации электрода и выходным напряжением датчика скорости. Измерение фазового сдвига сопряжено с большими трудностями, поскольку напряжение  $U_{\Pi}$  имеет значительные

Таблица 3.2. Фазовый сдвиг в усилителе на разных частотах

$f$ , Гц	17,5	20	25	30	35
$\varphi$ , град.	+113	+109	+98	+90	+86

Таблица 3.3. Фазовый сдвиг между  $U_{\Pi}$  и напряжением датчика скорости

$f$ , Гц	17.5	25	35
$\Delta\varphi$ , град	+120	+90	+90



флуктуации амплитуды и зашумлено. Измерение производилось с помощью двухлучевого осциллографа, развертка которого была синхронизирована от генератора, служившего источником возбуждения для громкоговорителя. По указанным ранее причинам точность измерения  $\Delta\varphi$  составляла около  $10^\circ$ . Результаты измерений приведены в таблице 3.3. Учитывая фазовый сдвиг в канале измерения  $U_{II}$  (см. Таблицу 3.2), в действительности напряжение  $U_{II}$  практически синфазно с выходным сигналом датчика скорости, т.е. со скоростью движения подвижного электрода.

Представляет интерес сравнение зависимости напряжения на электродах от концентрации электролита с подобной зависимостью, исследованной в разделах 3.1 и 3.2 (рисунок 3.9, рисунок 3.19). Сняты зависимости напряжения  $U_{II}$  от частоты колебаний при разной концентрации электролита. В экспериментах использован раствор NaCl с концентрацией  $S = 20, 10$  и  $5$  г/л. Измерение зависимостей  $U_{II}(f)$  производилось путем перестройки частоты возбуждающего генератора, установки амплитуды колебаний  $A = 1$  мм и цифрового отсчета величины  $U_{II}$  по экрану спектрального анализатора с помощью яркостной отметки. Эксперименты производились в течение длительного (около двух недель) времени, большую часть которого электроды находились в электролите. Даже при поддержании концентрации электролита неизменной, это привело к снижению величины  $U_{II}$  к концу измерений. Поэтому произведено попарное сравнение результатов опытов, не разделенных значительным временным интервалом. На рисунке 3.29 приведены зависимости  $U_{II}(f)$  для  $S_1 = 20$  г/л (1) и  $S_2 = 10$  г/л (2), а также измеренные в другое время зависимости  $U_{II}(f)$  для  $S_3 = 10$  г/л (3) и  $S_4 = 5$  г/л (4). Как следует из полученных данных, изменение концентрации электролита в 2 раза приводит к изменению  $U_{II}$  тоже приблизительно в 2 раза, причем разбавление электролита ведет к увеличению  $U_{II}$ . Во всех случаях графики зависимости  $U_{II}(f)$  на частотах ниже  $25 \dots 30$  Гц близки к линейным, проходящим через начало координат.

В большинстве опытов измеренные значения  $U_{II}$  значительно превышали уровень недостоверных значений, указанных ранее. Однако одинаковый ход всех графиков (рис. 3.29) даже при малых значениях  $U_{II}$  позволяет утверждать, что влияние электромагнитной индукции на результаты измерений в действительности меньше, чем ожидалось. Таким образом, зависимость электродного напряжения от концентрации электролита близка к изображенной на рисунке 3.9. Линейность графиков на рисунках 3.28 и 3.29 свидетельствует о линейной связи напряжения поляризации и скорости движения электрода. При этом напряжение поляризации синфазно со скоростью движения электрода.

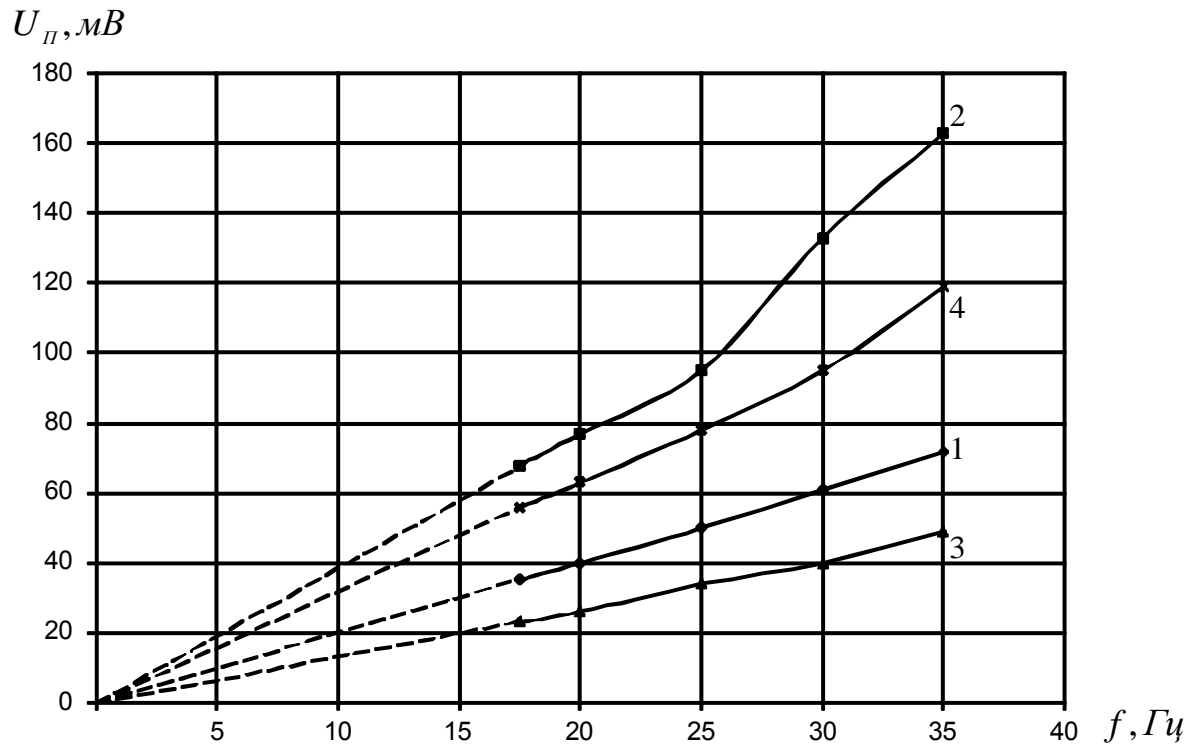


Рисунок 3.29 - Зависимость напряжения поляризации  $U_{II}$  от частоты колебаний при разной концентрации электролита. 1- 20 г/л; 2, 3 – 10 г/л; 4 – 5г/л

### 3.4. Краткие выводы

Установлено, что при движении электродов относительно окружающего электролита возникает специфический шум движения, превышение которого над тепловым шумом по напряжению достигает нескольких порядков. Именно он и определяет чувствительность буксируемых электродных датчиков. При наличии пульсаций средней скорости потока шум движения непосредственно связан с пульсациями скорости. В отсутствие флуктуаций средней скорости потока спектральные зависимости шумового напряжения в лабораторных экспериментах имеют вид  $f^{-\alpha}$  и объясняются наличием турбулентности. Шум движения обратно пропорционален квадратному корню из площади электродов и увеличивается с разбавлением электролита. С увеличением времени выдержки электродов в электролите шум движения уменьшается. Установлено, что наименьший шум движения из исследованных металлов наблюдается у тантала и титана. У нержавеющей стали он несколько больше. Установлено, что пульсации электродного потенциала в пульсирующем потоке электролита имеют инерционность относительно пульсаций скорости, определяемую постоянной времени порядка единиц миллисекунд. Доказано, что пульсации давления жидкости не оказывают влияния на электродный потенциал. Причины возникновения шума движения и методы его уменьшения рассмотрены в главе 4.

## Глава 4. Природа шума движения и методы его уменьшения

[82-84, 87-93]

### *4.1. Связь пульсаций потенциала электрода с пульсациями скорости электролита вследствие модуляции толщины диффузионного слоя*

В главе 3 приведены результаты экспериментального исследования шума, возникающего при движении электрода в электролите. Механизм возникновения шума движения в известной автору литературе не описан, однако существуют основания, чтобы предположить электрохимическую природу шума движения [36; 94] (Скорчеллетти, Левич). Электрохимические реакции, протекающие на поверхности электрода, являются причиной флуктуаций его потенциала относительно электролита. Рассмотрим следующую модель возникновения шума движения, связанную с модуляцией толщины диффузионного слоя жидкости на поверхности электрода и скорости адсорбции кислорода поверхностью электрода.

На отшлифованной поверхности металлического электрода еще на воздухе происходит адсорбция кислорода, в результате чего кислород в виде моноатомного слоя покрывает некоторые участки поверхности. После погружения электрода в раствор электролита (в частности, в морскую воду) процесс адсорбции растворенного в электролите кислорода на его поверхность продолжается. Адсорбированный кислород вступает в реакцию с металлом электрода и образует окисел, молекула которого ориентирована таким образом, что на поверхности электрода появляются отрицательно заряженные ионы кислорода. Если окисел не образуется (например, на благородных металлах), то электрон металла присоединяется к атому кислорода, в результате на поверхности электрода тоже появляется отрицательно заряженный ион кислорода. При этом потенциал металла смещается в положительную сторону относительно электролита. Указанные процессы приводят к образованию избыточного отрицательного заряда на поверхности электрода. В электролите вблизи поверхности электрода при этом образуется избыточный по-

ложительный заряд из ионов растворенной соли. Таким образом, на поверхности электрода формируется двойной электрический слой в виде конденсатора с потерями, одна из обкладок которого жидкостная. Потенциал поверхности электрода относительно электролита определяется отношением заряда поверхности  $Q$  к емкости  $C_D$  двойного электрического слоя:

$$\varphi = Q/C_D. \quad (4.1)$$

Этот потенциал изменяется, поскольку процесс адсорбции кислорода и образование окисла с участием адсорбированного кислорода продолжаются. У поверхности электрода существует слой электролита, в котором концентрация атомов кислорода меньше, чем в толще электролита, поскольку они вступают в реакцию с металлом или адсорбируются поверхностью. Этот слой называют диффузионным, поскольку поступление кислорода к поверхности электрода происходит в основном за счет диффузии. В соответствии с первым законом Фика скорость осаждения кислорода на единицу площади поверхности электрода (плотность диффузионного потока) пропорциональна градиенту его концентрации в диффузионном слое [36] (Скорчеллетти) :

$$\frac{dN}{dt} = N_A D \frac{dc}{dy}, \quad (4.2)$$

где  $dN$  - число атомов осажденного кислорода за время  $dt$ ,  $N_A$  - число Авогадро,  $D$  - коэффициент диффузии кислорода,  $dc/dy$  - градиент концентрации  $c$  (моль/л) кислорода в направлении оси  $y$ , перпендикулярной к поверхности. Толщина диффузионного слоя  $\delta$  в набегающем на электрод потоке жидкости зависит от его скорости и составляет примерно 0,1 от толщины пограничного слоя Прандтля  $\delta_0$ , т. е.  $\delta = 0,1\delta_0$ . В пограничном слое скорость жидкости линейно увеличивается вдоль оси  $y$ , перпендикулярной к поверхности, от нуля до значения  $V_0$  на внешней границе  $\delta_0$  пограничного слоя. Как показано в [95] (Шлихтинг), в случае ламинарного обтекания полубесконечной гладкой пластинки толщину пограничного слоя в водном электролите можно определить как

$$\delta_0 \approx 3 \sqrt{\frac{\nu x}{V_0}}. \quad (4.3)$$

Здесь  $\nu$  - кинематическая вязкость жидкости,  $x$  - расстояние от переднего края пластинки,  $V_0$  - скорость жидкости вдали от поверхности. Из формул 4.1-4.3 следует, что пульсации скорости жидкости модулируют толщину диффузионного слоя и скорость диффузии кислорода на поверхность электрода. В результате заряд поверхности электрода и его потенциал относительно электролита получает пульсационную составляющую. На этом основана развитая далее диссертантом электрохимическая модель возникновения электродного шума движения.

Будем считать поток диффузии предельным. При этом все атомы кислорода, достигающие за счет диффузии поверхности электрода, мгновенно ею поглощаются (адсорбируются или вступают в реакцию с металлом, образуя окисел). В таком случае концентрация кислорода в электролите у поверхности электрода равна нулю, поэтому градиент концентрации можно определить как  $c_0/\delta$ , т. е. как отношение концентрации кислорода в толще электролита к толщине диффузионного слоя  $\delta$ . В соответствии с (4.2) за время  $\Delta t$  на площадь  $S$  поверхности электрода осаждаются  $N$  атомов кислорода:

$$N = N_A DS \frac{dc}{dy} \Delta t. \quad (4.4)$$

При этом заряд поверхности возрастает на величину  $\Delta Q = 2eN$  соответственно валентности кислорода, где  $e$  - заряд электрона. Пусть вдоль плоской поверхности электрода перпендикулярно его переднему краю в направлении оси  $x$  движется поток электролита. Обозначим  $V_0$  скорость потока вдали от поверхности. У поверхности электрода существует сформированный пограничный слой, толщина которого  $\delta_0$  зависит от координаты  $x$ . В момент времени  $t = 0$  скорость потока, т.е. скорость жидкости на внешней границе пограничного слоя, скачкообразно уменьшается до нуля. На пограничный слой действуют тормозящие силы, величина которых зависит от градиента скорости у каждой границы. На внешней границе эта сила во много раз выше, чем на внутренней, т. е. у поверхности электро-

да. Достаточно быстро профиль скорости в направлении оси  $y$  приобретает такую же форму, как в случае течения потока жидкости между двумя параллельными пластинами (рисунок 4.1) под действием разности давлений  $\Delta p$ . Теперь обе вязкие тормозящие силы в соответствии с формулой Ньютона [94] (Левич) равны

$$F = \eta S \frac{dV}{dy}, \quad (4.5)$$

где  $\eta = \nu\rho$  - динамическая вязкость жидкости,  $\rho$  - плотность жидкости. Расстояние между пластинами равно  $\delta_0$ . Равнодействующая сил давления в установившемся режиме уравнивается двумя тормозящими силами  $F$ . Пусть значение  $y = 0$  соответствует середине щели между пластинами. Для слоя жидкости в середине щели с координатами от  $-y$  до  $+y$  справедливо равенство

$$2ay\Delta p = -\eta aL \frac{dV}{dy}, \quad (4.6)$$

где  $L$  - длина пластин,  $a$  - их ширина (то же, что длина и ширина электрода).

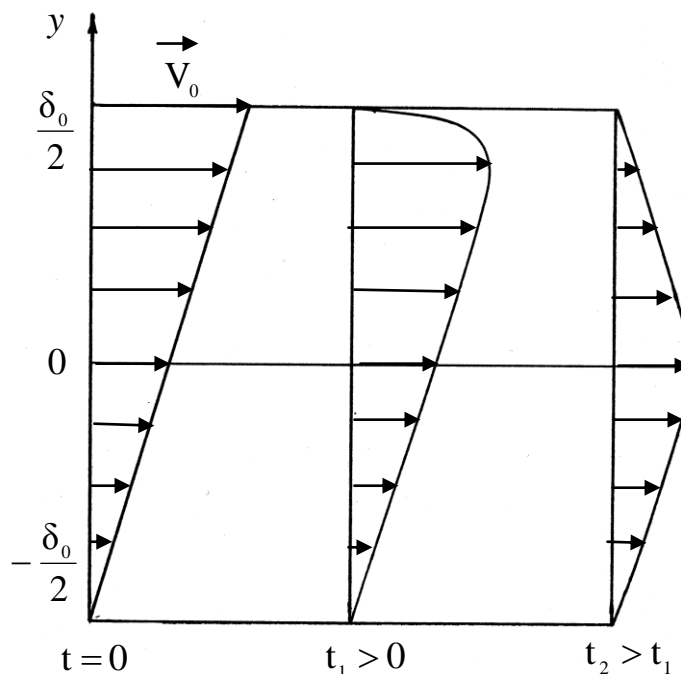


Рисунок 4.1 - Эпюры вектора скорости жидкости в пограничном слое при скачкообразном уменьшении скорости потока до нуля в разные моменты времени  $t$

Интегрируя (4.6) при начальном условии  $V = 0$ , если  $y = \delta_0 / 2$ , получим зависимость скорости жидкости от координаты  $y$ :

$$V(y) = \frac{\Delta p}{\eta L} \left( \frac{\delta_0^2}{4} - y^2 \right) = V_{\text{макс}} \left( 1 - \frac{4y^2}{\delta_0^2} \right), \quad (4.7)$$

где максимальное значение скорости при  $y = 0$  равно

$$V_{\text{макс}} = \Delta p \delta_0^2 / 4\eta L. \quad (4.8)$$

Полагаем, что  $V_{\text{макс}} = 0,5V_0$ , так как в момент  $t = 0$  значение скорости в пограничном слое при  $y = 0$  было именно таким. Градиент скорости жидкости у пластин

$$\frac{dV}{dy} = -2 \frac{V_0}{\delta_0}. \quad (4.9)$$

Модуль тормозящей силы, действующей со стороны двух пластин на длине  $dx$ , в установившемся режиме при скорости в середине пограничного слоя  $V_{\text{макс}} = 0,5V_0$

$$dF = 4\eta a (V_0 / \delta_0) dx. \quad (4.10)$$

Скорость в середине пограничного слоя при скачкообразном изменении скорости потока зависит от времени, поэтому обозначим ее  $V(t)$ . Тогда

$$dF = 4\eta a \frac{V(t)}{\delta_0} dx = \frac{4\eta a V(t)}{3\sqrt{\nu x / V_0}} dx. \quad (4.11)$$

В знаменателе стоит значение скорости  $V_0$ , поскольку пограничный слой уже был сформирован на всей площади пластин и его толщина определяется выражением (4.3). На всей длине  $L$  пластин (электрода) тормозящая сила

$$F = \int_0^L dF = \frac{8\eta a}{3} \sqrt{\frac{V_0 L}{\nu}} V(t). \quad (4.12)$$

Уравнение динамики для пограничного слоя на всей длине электрода имеет вид

$$m_{\text{экв}} \frac{dV}{dt} + F = 0, \quad (4.13)$$

где  $m_{\text{экв}}$  - эквивалентная масса всего пограничного слоя на длине электрода.

Найдем ее, исходя из кинетической энергии пограничного слоя. Для участка пограничного слоя длиной  $\Delta x$  кинетическая энергия определяется как



$$E_k = 2 \int_0^{\delta_0/2} \frac{\rho a \Delta x}{2} V^2(y) dy = \frac{1}{15} \rho a \delta_0 \Delta x V_0^2. \quad (4.14)$$

Эту же кинетическую энергию можно определить как  $E_k = \rho a \Delta x \delta_0 \bar{V}^2 / 2$ , откуда находим среднее энергетическое значение скорости пограничного слоя:

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{2}{15}} V_0, \quad (4.15)$$

что составляет  $0,365V_0$ . Кинетическая энергия всего пограничного слоя

$$E = 0,5 \int_0^L \bar{V}^2 \rho a \delta_0 dx = \frac{\rho a V_0^2}{15} \int_0^L \delta_0 dx = \frac{2}{15} \rho a V_0^{1,5} L^{1,5} \nu^{0,5}. \quad (4.16)$$

Эта же энергия равна  $0,5m_{\text{эКВ}} \bar{V}^2$ , откуда

$$m_{\text{эКВ}} = 2\rho a L \sqrt{\nu L / V_0}. \quad (4.17)$$

Теперь уравнение (4.13) можно записать в виде

$$\frac{dV}{dt} + \frac{4V_0}{3L} V = 0. \quad (4.18)$$

При начальном условии: время  $t \rightarrow \infty, V \rightarrow 0,5V_0$  решение уравнения имеет вид

$$V(t) = 0,5V_0(1 - e^{-t/\tau_1}), \quad (4.19)$$

где

$$\tau_1 = 3L/4V_0 \quad (4.20)$$

- постоянная времени установления новых параметров пограничного слоя. Можно считать, что такая же постоянная времени и у диффузионного слоя. Учитывая только адсорбцию кислорода в электролите, в соответствии с (4.3) и (4.4) заряд поверхности электрода длиной  $L$  через время  $t$  запишем как

$$Q \approx 6,7FDac_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu}} \int_0^t \int_0^L \frac{dtdx}{\sqrt{x}}, \quad (4.21)$$

где  $F = eN_A$  - число Фарадея.

Пусть скорость потока скачкообразно возрастает на величину  $\Delta V_0 \ll V_0$ . Скорость течения в середине пограничного слоя возрастает в соответствии с (4.19). В силу неразрывности потока, текущего в пограничном слое, толщина по-

следнего уменьшается, а градиент концентрации кислорода увеличивается. Выражение (4.21) можно переписать в виде

$$Q \approx 6,7FDac_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu}} \int_0^t \int_0^L \frac{1 + \frac{\Delta V_0}{V_0} (1 - e^{-t/\tau_1})}{\sqrt{x}} dx dt. \quad (4.22)$$

Интегрируя (4.22), получаем

$$Q(t) \approx 13,4FDac_0 \sqrt{\frac{V_0 L}{\nu}} t - 13,4FDac_0 \frac{\Delta V_0}{V_0} \sqrt{\frac{V_0 L}{\nu}} \tau_1 (1 - e^{-t/\tau_1}). \quad (4.23)$$

Первое слагаемое есть медленно меняющаяся величина, обусловленная постоянным ростом заряда электрода вследствие диффузии, обозначим его  $Q_0$ . Второе слагаемое обусловлено скачком скорости, обозначим его  $\Delta Q$ . Изменение потенциала электрода при скачке скорости  $\Delta V_0$  составляет

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta Q}{C_D} = -\frac{13,4FDLac_0 \Delta V_0 \tau_1}{C_D \sqrt{LV_0 \nu}} (1 - e^{-t/\tau_1}) = -\varphi_m (1 - e^{-t/\tau_1}). \quad (4.24)$$

Здесь  $C_D$  - емкость двойного электрического слоя. Выражение (4.24) соответствует реакции четырехполосника с переходной характеристикой  $h(t) = 1 - e^{-t/\tau_1}$  на скачок напряжения  $\varphi_m$ . В частотной области коэффициент передачи этого четырехполосника имеет вид

$$K(\omega) = 1/\sqrt{1 + (\omega\tau_1)^2}. \quad (4.25)$$

Этот коэффициент передачи определяет форму частотного спектра пульсаций электродного потенциала, обусловленного пульсациями скорости потока электролита. Пусть  $\Delta V_0 = V_m \sin \omega_0 t$ . Пульсация электродного потенциала в этом случае зависит от частоты пульсации скорости:

$$\varphi(t) = \frac{\varphi_m}{\sqrt{1 + (\omega_0 \tau_1)^2}} \sin \omega_0 t. \quad (4.26)$$

Из полученных диссертантом формул следует, что пульсация потенциала электрода пропорциональна пульсации скорости жидкости и имеет инерционность по отношению к пульсации скорости, определяемую постоянной времени  $\tau_1$ .

В процессе адсорбции поверхность электрода покрывается моноатомным слоем кислорода, затем кислород, вступая в реакцию с металлом, образует пленку окисла. Осаждение кислорода продолжается на поверхность окисла, что приводит к увеличению толщины окисной пленки вследствие диффузии атомов кислорода к поверхности металла. Скорость осаждения становится меньше предельной вследствие уменьшения градиента концентрации. На поверхности электрода могут одновременно существовать как области без адсорбированного кислорода, так и области, покрытые адсорбированным кислородом и окисной пленкой. Итак, поверхность металлического электрода адсорбирует кислород, диффундирующий из толщи электролита. Адсорбированный кислород образует моноатомный слой и, вступая в реакцию с металлом электрода, пленку окисла. Логично предположить, что скорость адсорбции  $\Delta m / \Delta t$  на поверхность, уже покрытую слоем адсорбированного кислорода или окислом, много меньше, чем на чистую металлическую поверхность, площадь которой  $S$  уменьшается с течением времени:

$$S = S_0 - m / \rho d, \quad (4.27)$$

где  $\rho$  - плотность моноатомного слоя кислорода,  $d$  - толщина слоя, равная диаметру атома,  $S_0 = La$  - площадь поверхности всего электрода,  $m$  - масса осажденного кислорода. Учитывая что  $\rho = m_0 / d^3$ , где  $m_0$  - масса атома кислорода,  $m_0 = A / N_A$ ,  $A$  - атомная масса кислорода, получим

$$S = S_0 - \frac{m N_A d^2}{A}. \quad (4.28)$$

Масса кислорода, переносимая в соответствии с законом Фика [36] (Скорчеллетти) за время  $dt$  через площадь  $S$ , составляет

$$dm = SDA \frac{dc}{dy} dt. \quad (4.29)$$

С учетом (4.28) уравнение (4.29) можно записать в виде

$$\frac{dm}{dt} + \frac{Dc_0 N_A d^2}{\delta} m = \frac{Dc_0 S_0 A}{\delta}. \quad (4.30)$$

Это линейное неоднородное уравнение процесса с постоянной времени

$$\tau_2 = \frac{\delta}{Dc_0N_A d^2}. \quad (4.31)$$

Его решение имеет вид

$$m(t) = \frac{S_0 A}{N_A d^2} (1 - e^{-t/\tau_2}). \quad (4.32)$$

Площадь чистого металла с течением времени уменьшается по закону

$$S(t) = S_0 e^{-t/\tau_2} \quad (4.33)$$

Вычислим постоянную времени  $\tau_2$ . Типичная концентрация атомов кислорода при температуре  $20^\circ\text{C}$  для воды с открытой поверхностью составляет  $c_0 = 0,5 \cdot 10^{-3}$  моль/л. Для атомов кислорода в водном электролите  $D = 2,6 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. Толщина диффузионного слоя  $\delta$  для электрода с длиной  $L = 2,5$  мм при скорости потока  $V_0 = 0,5$  м/с имеет порядок  $10^{-5}$  м. Подставляя в (4.31) значения  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>,  $d = 1,3 \cdot 10^{-10}$  м, получим  $\tau_2 \approx 5 \cdot 10^3$  с. Процесс адсорбции протекает медленно, его скорость определяется концентрацией растворенного кислорода. Формула (4.24) получена при условии, что адсорбция кислорода происходит на всей площади поверхности электрода. В соответствии с вышеизложенным площадь  $S_0 = La$  в (4.24) следует заменить на выражение (4.33). Тогда получим

$$\varphi_m = \frac{13,4 F D S_0 c_0 \Delta V_0 \tau_1}{C_D \sqrt{L V_0 \nu}} e^{-t/\tau_2}. \quad (4.34)$$

Емкость двойного электрического слоя на всей площади электрода

$$C_D = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_0}{\delta_D}, \quad (4.35)$$

где  $\delta_D$  - толщина двойного слоя,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м - электрическая постоянная,  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость между обкладками двойного слоя. В плотной части двойного слоя  $\varepsilon \approx 3$ , в диффузной части при небольшой концентрации электролита значение  $\varepsilon$  приближается к 81[35] (Фрумкин). В растворе NaCl слабой концентрации [55] (Духин)

$$\delta_D \approx \frac{3}{\sqrt{c_1}} \cdot 10^{-10} \text{ м}, \quad (4.36)$$

где  $c_1$  - концентрация NaCl (моль/л). С учетом (4.33)-(4.36) скачок электродного потенциала при скачке скорости потока  $\Delta V_0$  определяется выражением

$$\Delta\varphi = -\frac{40,2 \cdot 10^{-10} F D c_0 \Delta V_0 \tau_1}{\varepsilon \varepsilon_0 \sqrt{c_1} L V_0 \nu} e^{-t/\tau_2} (1 - e^{-t/\tau_1}) = -\Delta\varphi_m e^{-t/\tau_2} (1 - e^{-t/\tau_1}) \quad (4.37)$$

Полагая  $c_1 = 0,077$  моль/л,  $\tau_1 = 3,75 \cdot 10^{-3}$  с,  $\Delta V_0 = 5 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $V_0 = 0,5$  м/с,  $F = 9,64 \cdot 10^4$  Кл/моль,  $L = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $\nu = 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, (остальные параметры указаны выше), получим значение  $\Delta\varphi_m$  порядка единиц микровольт.

Можно предположить, что на инерционность потенциала электрода по отношению к пульсации градиента концентрации может влиять и инерция диффузионного потока, то есть инерция атомов кислорода, движущихся к электроду под действием осмотического давления  $p_{осм} = c_0 RT$  [36] (Скорчеллетти). Здесь  $c_0$  - концентрация кислорода на внешней границе диффузионного слоя в моль/л,  $R = 8,31 \text{ Дж/К}$  - универсальная газовая постоянная,  $T$  - абсолютная температура. Оценим влияние этой инерции. Сила, действующая на один атом в слое, толщиной  $dy$

$$F = \frac{kT}{c_0} \frac{dc}{dy}. \quad (4.38)$$

Здесь  $dc/dy$  - градиент концентрации кислорода в диффузионном слое. Уравнение динамики для молекулы кислорода, движущейся ламинарно в вязкой среде

$$m_0 V' = F - k_{TP} V, \quad (4.39)$$

где  $k_{TP}$  - коэффициент вязкого трения. В установившемся режиме  $F = k_{TP} V$ . Учитывая, что  $V = dy/dt$ ,

$$k_{TP} = \frac{kT}{c_0} \frac{dc}{dy} \frac{dy}{dt}. \quad (4.40)$$

Масса кислорода, переносимая в соответствии с законом Фика [36] (Скорчеллетти) за время  $dt$  через площадь  $S$

$$dm = SDA \frac{dc}{dy} dt, \quad (4.41)$$

где  $A$  - атомная масса кислорода,  $D$  - коэффициент диффузии. Эта масса равна массе всех перенесенных атомов из слоя толщиной  $dy$ , то есть

$$dm = Ac_0 S \cdot dy \quad (4.42)$$

Из (4.41) и (4.42)  $\frac{dy}{dt} = \frac{D}{c_0} \frac{dc}{dy}$ . Подставляя это значение  $dy/dt$  в (4.40), получаем

$$k_{TP} = \frac{kT}{D}. \quad (4.43)$$

Теперь уравнение динамики можно записать в виде

$$V' + \frac{RT}{DA} V = \frac{RT}{c_0 A} \frac{dc}{dy} \quad (4.44)$$

Его решение имеет вид

$$V(t) = \frac{D}{c_0} \frac{dc}{dx} (1 - e^{-t/\tau_1}) \quad (4.45)$$

Инерционность процесса определяется постоянной времени  $\tau_1 = \frac{DA}{RT}$ , которая для водного электролита имеет величину порядка  $10^{-15}$  секунды, поэтому ей можно пренебречь.

Сравним результаты расчета по формуле (4.37) величины пульсации электродного потенциала с измеренными в наших экспериментах значениями. При времени выдержки электродов в электролите до нескольких часов по порядку величины расчетные значения совпадают с измеренными пульсациями напряжения

между электродами. В наших экспериментах при времени выдержки 0,5...6 часов отмечались значения пульсаций электродного напряжения от единиц микровольт до десятых долей микровольт в полосе 1...100 Гц. Уменьшение чувствительности датчика к пульсациям скорости с увеличением времени выдержки электрода в электролите, которое наблюдалось в экспериментах, объясняется уменьшением скорости адсорбции кислорода, то есть влиянием множителя  $e^{-t/\tau_2}$  в формуле (4.37). Адсорбция кислорода в неподвижном электролите происходит медленнее, чем в движущемся, поэтому, как правило, перед измерениями электроды выдерживались в электролите не менее 3 суток. Однако при длительной выдержке измеренные пульсации электродного напряжения существенно больше, чем значение  $\Delta\varphi_m$ , рассчитанное по формуле (4.37). В частности, амплитуда пика спектральной характеристики электродного напряжения на рисунке 3.17а составляет около 30 нВ при времени выдержки 17 суток, что на много порядков превосходит значение  $\Delta\varphi_m$ , рассчитанное по формуле (4.37). Это является следствием неучёта адсорбции кислорода на окисленную поверхность электрода. Как показано в разделе 2.2, процесс роста окисла не прекращается и после 1000 часов выдержки электродов в электролите, что отражается на уменьшении емкости электродного датчика (рисунок 2.14). Это приводит к уменьшению градиента концентрации кислорода в диффузионном слое. В соответствии с (4.37) зависимость заряда  $\Delta Q$  поверхности электрода, обусловленного скачком скорости потока  $\Delta V_0$ , от времени  $t$  определяется выражением

$$Q(t) = \frac{13,4FDLac_0\Delta V_0\tau_1}{\sqrt{V_0Lv}} e^{-t/\tau_2} (1 - e^{-t/\tau_1}). \quad (4.46)$$

При выводе (4.46) предполагалось, что на поверхность электрода уже покрытую адсорбированным кислородом или окисной пленкой адсорбция не идет. На самом деле адсорбция продолжается, хотя и с гораздо меньшей скоростью. Площадь электрода, покрытая адсорбированным кислородом,

$$S(t) = La(1 - e^{-t/\tau_2}). \quad (4.47)$$

Уменьшение скорости адсорбции на нее кислорода учтем введением коэффициента  $k_1(t)$ . Тогда выражение (4.46) дополнится слагаемым, учитывающим адсорбцию на ту часть поверхности электрода, где уже существует адсорбированный слой кислорода или окисел.

$$Q(t) = \frac{13,4FDLac_0\Delta V_0\tau_1}{\sqrt{V_0Lv}}(1 - e^{-t/\tau_1})(k_1(t) + e^{-t/\tau_2}(1 - k_1(t))). \quad (4.48)$$

Подставляя в (4.48) значение постоянной времени  $\tau_1 = 3L/4V_0$ , получим выражение для скачка потенциала электрода при скачке скорости потока  $\Delta V$ .

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta Q}{C_D} = -\frac{3 \cdot 10^{-9} F D c_0}{\varepsilon \varepsilon_0} \sqrt{\frac{L}{c_1 v V_0}} \cdot \frac{\Delta V_0}{V_0} (1 - e^{-t/\tau_1})(k_1(t) + e^{-t/\tau_2}(1 - k_1(t))). \quad (4.49)$$

Как следует из (4.49), при постоянной величине относительной пульсации скорости  $\Delta V_0/V_0$  чувствительность электрода к пульсациям скорости уменьшается с увеличением средней скорости потока  $V_0$ . Полагая электрод квадратным, площадь электрода  $S = L^2$ , тогда скачок потенциала  $\Delta\varphi$  пропорционален  $S^{0,25}$ .

Определим значение коэффициента  $k_1(t)$  для титановых электродов. Изменение скорости адсорбции кислорода можно определить по скорости роста окисной пленки на поверхности электрода. От толщины окисной пленки зависит емкость электрода относительно электролита. А скорость роста окисной пленки определяется скоростью диффузии кислорода. Следовательно, изменение скорости диффузии можно определить по зависимости емкости электрода от времени. Масса окисной пленки на поверхности электрода определяется произведением плотности  $\rho$  окиси титана  $TiO_2$  на ее объем  $V$ . Объем есть произведение толщины  $h$  пленки на площадь  $S$  электрода. Из формулы для емкости плоского конденсатора объем  $V = \varepsilon \varepsilon_0 S / C_{окс1}$ , где  $\varepsilon = 100$  - относительная диэлектрическая проницаемость окиси титана,  $C_{окс1}$  - емкость окисной пленки на поверхности одного электрода. Емкость между двумя электродами в электролите может быть представлена как емкость двух последовательно соединенных конденсаторов, определяющих емкость каждого электрода относительно электролита. Каждый из



них может быть представлен также последовательно соединенными двумя конденсаторами. Первый представляет собой двойной электрический слой на поверхности электрода, второй – конденсатор с диэлектриком в виде окисной пленки. На частоте 20 Гц измерена зависимость емкости  $C$  между двумя титановыми электродами диаметром 6 мм, помещенными в раствор NaCl с концентрацией 35 г/л, от времени выдержки  $t$  в электролите (рисунок 4.2, кривая 1). Сразу после погружения электродов в электролит окисная пленка еще не успела сформироваться, поэтому полагаем, что емкость, измеренная при  $t=0$ , определяется емкостью двойного слоя  $C_{дэс}$  электродов. Емкость окисной пленки двух электродов

$$C_{окс} = \frac{C}{1 - C/C_{дэс}}, \quad (4.50)$$

где  $C$  - измеренная емкость между электродами,  $C_{дэс} = 5,5$  мкф - емкость между электродами при  $t=0$ . Емкость окисной пленки одного электрода  $C_{окс1}(t)$  в два раза больше. Рассчитанная по (4.50) зависимость  $C_{окс1}(t)$  показана на рисунке 4.2

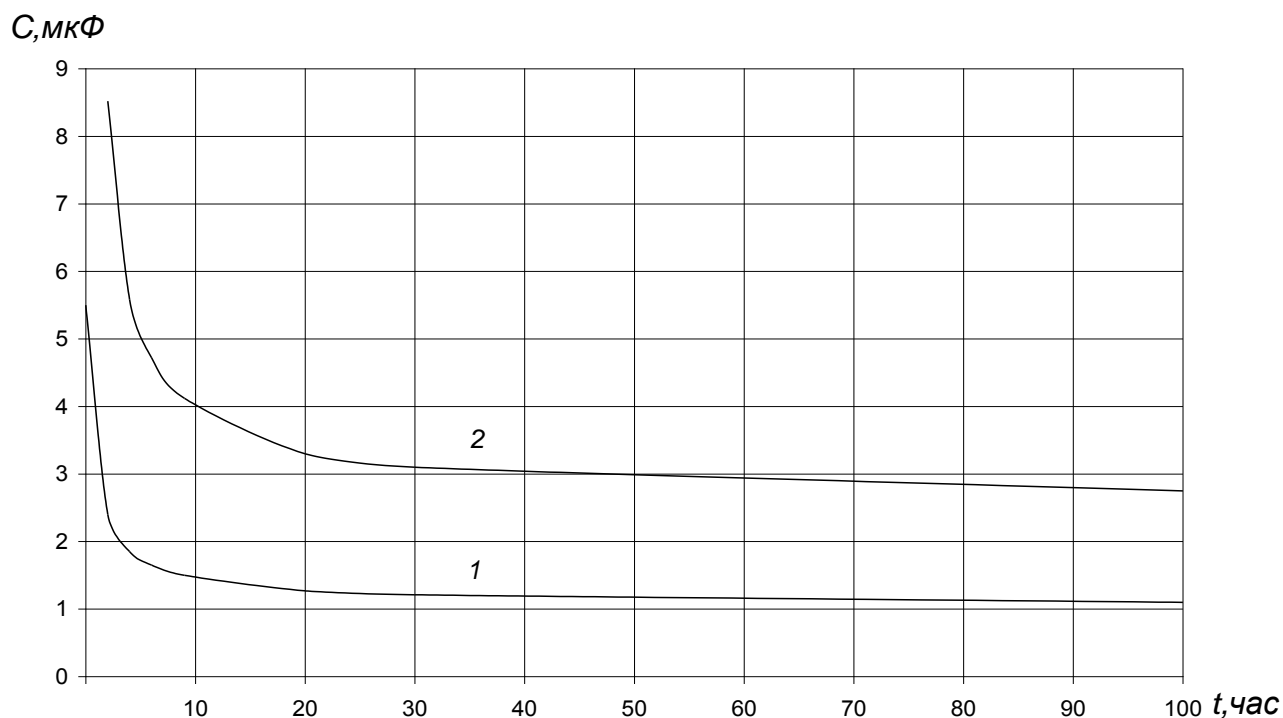


Рисунок 4.2 - Зависимость емкости титановых электродов от времени выдержки в электролите. 1- измеренная емкость, 2 – емкость окисной пленки одного электрода. Электроды диаметром 6 мм, электролит - раствор NaCl концентрацией 35 г/л, частота измерения 20 Гц

в виде кривой 2. Масса окисной пленки

$$m = \frac{\rho \varepsilon \varepsilon_0 S^2}{C_{\text{окс1}}} \quad (4.51)$$

Число молекул окисла

$$N = \frac{\rho \varepsilon \varepsilon_0 S^2 N_A}{M C_{\text{окс1}}}, \quad (4.52)$$

где  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> - число Авогадро,  $M$  - молярная масса  $\text{TiO}_2$ . На каждую молекулу окисла приходится один атом кислорода. Скорость адсорбции атомов кислорода

$$\frac{dN}{dt} = - \frac{\rho \varepsilon \varepsilon_0 S^2 N_A}{M C_{\text{окс1}}^2} \frac{dC_{\text{окс1}}}{dt}. \quad (4.53)$$

Здесь  $dC_{\text{окс1}}/dt$  - скорость изменения емкости окисной пленки. Сравним значение скорости адсорбции кислорода, определяемое формулой (4.53), с предельным значением при диффузии кислорода на чистый металл [36] (Скорчеллетти):

$$\frac{dN}{dt} = N_A D S \frac{c_0}{\delta}, \quad (4.54)$$

где  $D$  - коэффициент диффузии кислорода,  $c_0$  - концентрация кислорода в толще электролита,  $\delta$  - толщина диффузионного слоя. Поделив (4.53) на (4.54), получим  $k_1(t)$ .

$$k_1(t) = - \frac{\rho \varepsilon \varepsilon_0 S \delta}{M D c_0 C_{\text{окс1}}^2} \frac{dC_{\text{окс1}}}{dt}. \quad (4.55)$$

Подставим в (4.55) значения  $\rho = 4240$  кг/м<sup>3</sup>,  $M = 0,112$  кг,  $c_0 = 0,5 \cdot 10^{-3}$  моль/л,  $S = 28,3 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>,  $D = 2,6 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. Получим

$$k_1(t) = - \frac{7,29 \cdot 10^{-3}}{C_{\text{окс1}}^2} \frac{dC_{\text{окс1}}}{dt}. \quad (4.56)$$

В диапазоне  $t = 20 \dots 100$  часов зависимость  $C_{\text{окс1}}(t)$  с точностью не хуже 1% аппроксимируется степенной функцией  $C_{\text{окс1}} = 4,555 t^{-0,11}$ , где  $C_{\text{окс1}}$  в микрофарадах,  $t$  – в часах. В единицах системы СИ зависимость емкости окисной пленки одного электрода относительно электролита от времени

$$C_{\text{окс1}} = 11,21 \cdot 10^{-6} t^{-0,11}. \quad (4.57)$$

В соответствии с (4.57) скорость изменения емкости окисной пленки выражается формулой

$$\frac{dC_{\text{окс1}}}{dt} = -1,233 \cdot 10^{-6} t^{-1,1}. \quad (4.58)$$

При времени выдержки электродов в электролите 1...4 суток в соответствии с (4.57) и (4.58) получим

$$k_1(t) = 7,15 t^{-0,89}. \quad (4.59)$$

Зависимость чувствительности электродного датчика к пульсациям скорости жидкости от времени в соответствии с (4.49) определяется коэффициентом

$$k_2(t) = k_1(t) + e^{-t/\tau_2} (1 - k_1(t)). \quad (4.60)$$

Зависимости  $k_1(t)$  и  $k_2(t)$ , рассчитанные по (4.59) и (4.60), приведены на рисунке 4.3.

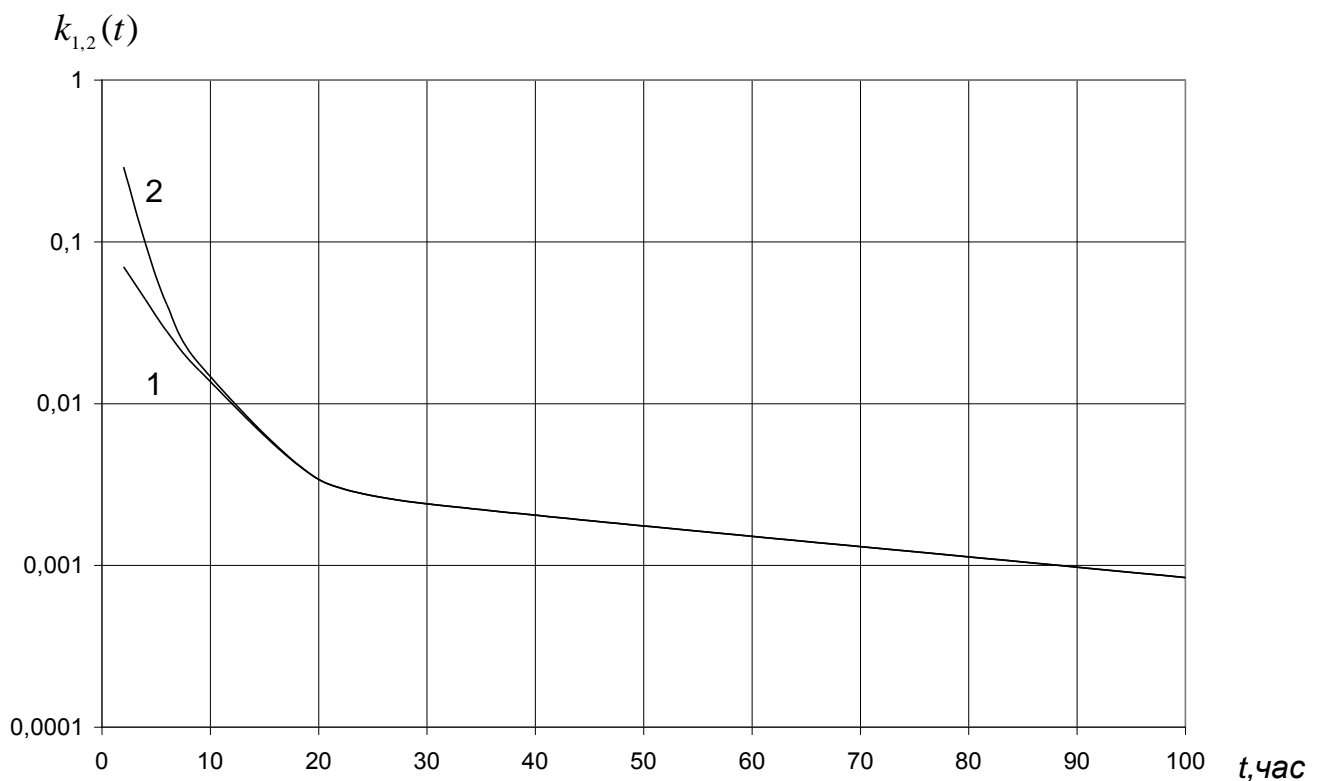


Рисунок 4.3 - Зависимости коэффициентов  $k_1$  (кривая 1) и  $k_2$  (кривая 2) от времени выдержки электродов в электролите

Из рисунка 4.3 видно, что при времени выдержки электродов в электролите больше 20 часов чувствительность электрода к пульсациям скорости определяется коэффициентом  $k_1(t)$ , который обратно пропорционален времени выдержки в степени меньше единицы. При  $t=100$  часов  $k_1(t)=0,84 \cdot 10^{-3}$ , т.е. чувствительность датчика к пульсациям скорости уменьшается более чем в 1000 раз. Но это значение на много порядков больше, чем при неучёте адсорбции на окисную пленку. При  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $\varepsilon = 81$ ,  $c_1 = 0,077$  моль/л,  $\tau_1 = 3,75 \cdot 10^{-3}$  с,  $\tau_2 = 5000$  с,  $\Delta V_0 = 5 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $V_0 = 0,5$  м/с,  $F = 9,64 \cdot 10^4$  Кл/моль,  $L = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $\nu = 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, по (4.49) получим значение  $\Delta \varphi_m$  порядка 1 нВ. Сравним результаты экспериментальных исследований пульсаций электродного потенциала, приведенных в разделе 3.2, с теоретическими значениями. Пульсации скорости потока приводят к модуляции толщины диффузионного слоя на поверхности электрода и, как следствие, к модуляции скорости адсорбции кислорода, что в свою очередь приводит к пульсациям потенциала электрода, то есть к появлению «шума движения». Формула (4.37) хорошо объясняет основные закономерности, выявленные в процессе экспериментов, в том числе совпадение пиков в спектрах электродного напряжения и напряжения датчика скорости потока, показанных на рисунке 3.17. Пик в спектре напряжения датчика на второй гармонике частоты пульсации скорости гораздо слабее, чем на первой, что, как показано выше, связано с инерционностью электрохимических процессов на поверхности измерительного электрода. В соответствии с (3.2) максимумы пиков в спектре электродного напряжения на первой и второй гармониках пульсации скорости (рисунок 3.17) соответствуют частотной характеристике фильтра нижних частот (4.25) с постоянной времени  $\tau = 4,4$  мс. Это значение  $\tau$  близко к вычисленному по (4.20) при  $L = 2,5$  мм и  $V_0 = 0,5$  м/с значению  $\tau = 3,75$  мс. В соответствии с (4.25) и разделом 3.2 влиянием инерционности рассмотренных электродных процессов при образовании шума движения можно пренебречь только на частотах ниже 35 Гц. Уменьшение чувствительности датчика к пульсациям скорости жидкости при увеличении концен-

трации раствора  $c_1$  вызваны увеличением емкости двойного электрического слоя. Увеличение концентрации электролита в 6 раз с 4,5 г/л до 27 г/л NaCl приводило к уменьшению пика в спектре электродного напряжения на частоте пульсации скорости в 2,05 раза (рисунок 3.19). Полученное в эксперименте уменьшение согласуется с значением 2,45 раза, рассчитанным по формуле (4.37). В разделе 3.2 измерена пульсация электродного потенциала электрода из нержавеющей стали, имеющей близкие с титаном импедансные характеристики. Электрод диаметром 2,5 мм находился в потоке раствора NaCl со скоростью 0,5 м/с и абсолютным значением пульсации скорости 0,02 м/с. При времени выдержки электрода в электролите 2 суток измеренное напряжение пульсации составило 11 нВ при концентрации раствора 27 г/л (0,46 моль/л). Наши экспериментальные исследования показали, что электроды из титана имели примерно в 1,5 раза более низкую чувствительность к пульсациям скорости жидкости, чем электроды из нержавеющей стали. Расчет  $\Delta\varphi$  по формуле (4.49) для титанового электрода дает значение  $\Delta\varphi = 3,5$  нВ при относительной диэлектрической проницаемости в двойном электрическом слое  $\varepsilon = 81$ . По порядку величины измеренная пульсация электродного потенциала совпадает с расчетной. При этом остается неопределенность в величине диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ , которая, по-видимому, имеет меньшее значение, что увеличивает расчетное значение  $\Delta\varphi$ .

#### ***4.2. Изменение потенциала электрода при деформации двойного электрического слоя***

Из формулы (4.37) следует, что с увеличением времени выдержки электродов в электролите чувствительность электрода к пульсациям скорости жидкости экспоненциально уменьшается. Выясним, чем эта чувствительность ограничена снизу, действительно ли она при длительной выдержке стремится к нулю. При помещении электрода в электролит на его поверхности, как указано в разделе 4.1, образуется двойной электрический слой. Причиной его образования в водных

электролитах на поверхности нерастворимых электродов является специфическая адсорбция имеющихся в электролите ионов. У обычно используемых для электродов металлов, имеющих на своей поверхности плотную диэлектрическую пленку окисла, ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ), образование двойного слоя связано с образованием хемосорбированных ионов кислорода, создающих отрицательный заряд поверхности [35; 37] (Фрумкин, Одынец). Жидкостная обкладка двойного слоя формируется за счет положительно заряженных ионов водорода и металлов, раствор солей которых и представляет собой электролит (например, ион  $\text{Na}^+$  при растворении  $\text{NaCl}$ ), называемых противоионами. Поскольку процесс адсорбции протекает медленно, время установления параметров двойного электрического слоя может составлять часы [35] (Фрумкин). В жидкостной обкладке двойного слоя выделяют плотную и диффузную части. Плотная часть двойного слоя представляет собой слой противоионов, сильно связанных электростатическими силами с заряженной поверхностью. Диффузной называют ту часть двойного слоя, где энергия взаимодействия противоионов с поверхностью сравнима с тепловой энергией или меньше ее в результате экранирования поверхностного заряда плотной частью жидкостной обкладки. При обтекании электрода потоком электролита часть жидкостной обкладки двойного слоя увлекается потоком по условной поверхности скольжения, отстоящей на некоторое расстояние  $z_1$  от поверхности электрода. Плоскость скольжения расположена внутри двойного слоя, т.е. в области, где потенциал отличается от потенциала в толще электролита на некоторую величину  $\zeta$ , что обуславливает возникновение ряда электрокинетических эффектов [48; 54] (Касимзаде, Харин). Электрокинетический потенциал  $\zeta$  зависит от структуры двойного слоя, которая, в свою очередь, определяется концентрацией противоионов в электролите и свойствами поверхности электрода. Измеренный электрокинетический потенциал для растворов  $\text{NaCl}$  составляет у разных диэлектриков единицы - десятки милливольт [16; 17] (Богородский). При увеличении концентрации электролита  $\zeta$  - потенциал стремится к нулю [55] (Духин).

Рассмотрим влияние деформации двойного электрического слоя в потоке электролита на потенциал электрода. Пусть плоский прямоугольный нерастворимый электрод (рисунок 4.4) длиной и шириной  $L$ , поверхность которого покрыта диэлектрической окисной пленкой и совпадает с плоскостью координат  $XOY$ , а передняя граница - с осью  $OX$ , встроен заподлицо в диэлектрическую поверхность, линейные размеры которой много больше  $L$ . На всей поверхности электрода существует сформированный двойной электрический слой, внутренняя обкладка которого образована адсорбированными ионами кислорода. Пусть на переднюю границу электрода набегаёт поток водного электролита, вектор скорости  $\vec{V}_0$  которого направлен по оси  $Y$ . Также в набегающем на электрод потоке

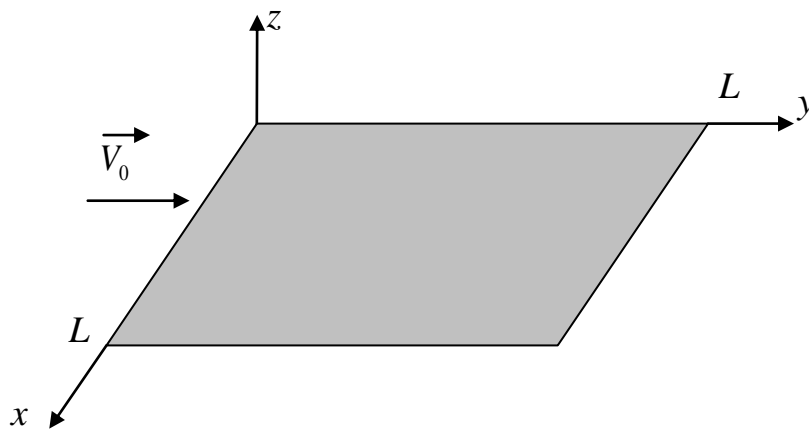


Рисунок 4.4 - Расположение поверхности электрода (показана тонировкой) в потоке жидкости

сформирована область вязкого подслоя, характеризующаяся линейным законом нарастания скорости по перпендикуляру к поверхности [53] (Рейнольдс). Вдоль оси  $Y$  возникает поверхностный ток, образуемый движущейся с потоком жидкостной обкладкой двойного электрического слоя. На передней границе электрода ( $Y = 0$ ) происходит замена сформированной диффузной части жидкостной обкладки двойного слоя электронейтральным электролитом, в связи с чем поверхность имеет нескомпенсированный заряд плотной части двойного слоя. Вблизи задней границы электрода ( $Y = L$ ) возникает заряд противоположного знака. Таким образом, вблизи поверхности электрода возникает электрическое поле, вызванное сторонней силой, стремящееся привести электрические заряды в равновесное со-

стояние. Избыточный заряд, смываемый с электрода на его задней границе, под действием этого электрического поля отводится в толщу электролита. Этот заряд экранируется ионами противоположного знака из раствора за время порядка  $10^{-10}$  с [56] (Дамаскин), поэтому не оказывает влияния на потенциал электрода. Вблизи передней границы электрода происходит восстановление структуры двойного электрического слоя, в процессе которого избыточные заряды также отводятся в толщу электролита, замыкая тем самым поверхностный ток. Таким образом, у поверхности электрода вблизи его передней границы существует электрическое поле, имеющее составляющие, направленные вдоль осей  $Z$  и  $Y$ . Составляющая  $E_z$  участвует в восстановлении структуры двойного слоя, а составляющая  $E_y$  оказывает влияние на скорость движения зарядов, либо ускоряя, либо тормозя их по отношению к скорости потока. Длина  $l$  в направлении оси  $Y$  невосстановленной части двойного слоя зависит от скорости  $V$ , которая сама различна на разных расстояниях  $Z$  от поверхности. Однако при достаточно высокой скорости потока можно достичь неравенства  $l \gg \delta_D$  ( $\delta_D$  - толщина двойного слоя). Это позволяет рассматривать заряженную границу электрода как заряженную плоскую полосу с изменяющейся плотностью заряда и, не претендуя на точный количественный расчет, получить качественную зависимость потенциала электрода от скорости потока. Как известно [55] (Духин), в статическом состоянии свободный заряд в электролите компенсируется противоионами таким образом, что за пределами радиуса Дебая  $d$  его электрическим полем можно пренебречь. Для разбавленных водных растворов постоянную времени релаксации двойного слоя обычно считают равной постоянной времени экранирования заряда в электролите  $\tau = \epsilon \epsilon_0 / \sigma$ , где  $\epsilon = 81$  - относительная диэлектрическая проницаемость электролита,  $\sigma$  - удельная электропроводность раствора [56] (Дамаскин). Толщина двойного слоя  $\delta_D$  примерно равна радиусу Дебая  $d$ . Время  $t$ , за которое поток проходит это расстояние,  $t \cong \delta_D / V$ . Выше было принято, что  $l \gg \delta_D$ , или  $V\tau \gg \delta_D$ , т.е.  $\delta_D / V \ll \tau$ . Это означает, что процесс релаксации в набегающем потоке не успевает произойти, и на скорость движения ионов электрическое поле



$E_y$  не оказывает существенного влияния. В дальнейшем будем предполагать, что относительное изменение плотности заряда противоионов в диффузной части двойного электрического слоя очень мало, поэтому его структура практически на всей площади электрода близка к существующей при отсутствии движения электролита.

Итак, пусть течение электролита направлено вдоль плоской поверхности электрода, причем поперечный профиль скорости соответствует выражению

$$V_y = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq z \leq z_1 \\ a(z - z_1) & \text{при } z > z_1 \end{cases} \quad (4.61)$$

Поскольку часть двойного слоя, для которой  $z > z_1$ , участвует в движении, то существует поверхностный ток с плотностью  $j_y = qnV$ , где  $q$  - заряд противоиона,  $n$  - избыточная концентрация противоионов,  $V$  - скорость течения. Как  $V$ , так и  $n$  являются функциями координаты  $z$ , поэтому поверхностный ток определяется формулой

$$i_y = \int_{z_1}^{\infty} \int_0^L j_y dz dx. \quad (4.62)$$

Концентрация избыточного заряда  $\rho(z) = qn(z)$  в двойном слое [55] (Духин)

$$\rho(z) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{d^2} \varphi_0 e^{-z/d}. \quad (4.63)$$

где  $\varphi_0$  - потенциал поверхности электрода. Подставляя (4.63) в формулу (4.62), получим с учетом выражения (4.61)

$$i_y = \int_{z_1}^{\infty} \int_0^L j_y dz dx = L \int_{z_1}^{\infty} V(z) \rho(z) dz = La \varepsilon_0 \varepsilon \varphi_0 e^{-z_1/d}. \quad (4.64)$$

Величина  $\varphi_0 e^{-z_1/d}$  обозначается  $\zeta$  и носит название электрокинетического потенциала [55] (Духин). Итак,

$$i_y = La \varepsilon_0 \varepsilon \zeta. \quad (4.65)$$

В состоянии равновесия для сохранения электронейтральности электрода должно удовлетворяться равенство  $i_y = i_z$ . Обозначим через  $dQ$  избыточный заряд элементарной площадки  $ds$ . Тогда

$$i_z = \int_s \sigma E ds = \int_s \frac{\sigma dQ}{2\varepsilon_0 \varepsilon ds} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0 \varepsilon} Q. \quad (4.66)$$

Отсюда избыточный краевой заряд внутренней обкладки двойного слоя

$$Q = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon}{\sigma} i_y = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon}{\sigma} La \varepsilon_0 \varepsilon \zeta. \quad (4.67)$$

То есть

$$Q = \varepsilon_0 \varepsilon \tau La \zeta. \quad (4.68)$$

Двойной электрический слой на поверхности электрода можно уподобить плоскому конденсатору, у которого пластины сдвинуты относительно друг друга, с той разницей, что силы электрического взаимодействия не могут втянуть заряды с открытых краев пластин в область их взаимного перекрытия. Этому препятствуют силы специфической адсорбции на передней границе электрода и силы внутреннего трения в жидкости на задней границе электрода. При сдвиге пластин конденсатора заряд  $Q_{пл}$  на каждой из них сохраняется, а емкость  $C$  уменьшается на некоторую величину  $\Delta C \ll C$ , причем относительное изменение емкости конденсатора приблизительно равно относительному изменению площади перекрывающейся части пластин. Следовательно, разность потенциалов между пластинами увеличивается на некоторую величину  $\varphi$ . Такой потенциал приобретает поверхность электрода по отношению к движущемуся электролиту. Считая поверхностную плотность заряда постоянной на всей площади  $S$  пластин,

$$\varphi = \frac{Q_{пл} \Delta C}{C^2} = \frac{Q}{C}, \quad (4.69)$$

где  $Q$  - заряд неперекрывающейся части пластин. Для конденсатора, образованного двойным электрическим слоем на поверхности электрода, в соответствии с (4.69) получим изменение разности потенциалов на обкладках металл-электролит

$$\varphi = \frac{\tau \zeta \varepsilon_0 \varepsilon La}{C}, \quad (4.70)$$

где  $C$  - емкость двойного слоя электрода. Учитывая, что  $C = C_{уд}S$ ,

$$\varphi = \frac{a\tau\zeta\varepsilon_0\varepsilon L}{SC_{уд}}. \quad (4.71)$$

Таким образом, при движении в жидкости электрод приобретает потенциал относительно толщи электролита, то есть поляризуется. Пульсациям скорости движения соответствуют пульсации потенциала, которые являются составляющей шума движения. Формула (4.71) получена для идеализированной модели обтекания электрода потоком электролита. Предполагается, что электрод плоский, а вязкий подслой сформирован по всей площади электрода. Реальный электрод имеет поверхность с множеством микровыступов, высота которых существенно превышает толщину двойного слоя. Процессы деформации двойного слоя на краю электрода не оказывают существенного влияния на поляризацию всего электрода, поскольку в силу большого числа микровыступов именно на их вершинах и происходит в основном смыв заряда, который приводит к флуктуации потенциала электрода. Потенциал поляризации электрода в целом определяется как сумма избыточных зарядов на всех микровыступах отнесенная к емкости всего электрода. Подавляющее большинство микровыступов находится в области уже сформированного вязкого подслоя, а их протяженность вдоль направления вектора скорости существенно превышает толщину двойного слоя, поэтому процесс формирования на них избыточного заряда в основном совпадает с рассмотренным. Согласно данным [54; 38] (Харин, Одынец) микронеровности на поверхности полированных электродов, которые применялись в наших экспериментах, имеют размер порядка  $10^{-7}$  м, что значительно превышает толщину двойного слоя (порядка  $10^{-9}$  м). Число микровыступов  $N$  на площади  $S$  электрода определяется числом  $n = N/S$  микровыступов на  $1 \text{ м}^2$ . Суммарный избыточный заряд всех микровыступов на площади  $S$  электрода в соответствии с (4.68)

$$Q = nS\varepsilon_0\varepsilon\tau La\zeta \quad (4.72)$$

Потенциал электрода относительно электролита

$$\varphi = \frac{Q}{C} = \frac{n\tau\varepsilon_0\varepsilon La\zeta}{C_{\text{вд}}}. \quad (4.73)$$

Электродный датчик содержит два расположенных в электролите электрода, подключенных к сопротивлению нагрузки. Поскольку постоянный ток через окисную пленку протекать не может, то напряжение на нагрузке может существовать только при нестационарном характере течения. Если флуктуации скорости потока имеют длительность  $t \ll \tau_0 = (R + r)C/2$ , где  $R$  - сопротивление нагрузки,  $r$  - сопротивление внутренней цепи электродной ячейки (сопротивление растекания между электродами), то ток в нагрузке определяется выражением

$$i(t) \cong \frac{n\tau\zeta\varepsilon_0\varepsilon L}{C_{\text{вд}}(R + r)}(a_1(t) - a_2(t)). \quad (4.74)$$

Из него следует, что напряжение на сопротивлении нагрузки пропорционально флуктуациям скорости потока. В формуле (4.73) присутствует коэффициент  $a$ , имеющий неопределенное значение. Определим потенциал электрода для реальных условий эксплуатации. Пусть плоский электрод имеет форму квадрата со стороной  $l$ . Число микровыступов  $N$  на площади  $S$  электрода определяется концентрацией  $n = N/S$  микровыступов на  $1 \text{ м}^2$ . На площадке шириной  $l$  и длиной  $dy$  находится  $nl \cdot dy$  микровыступов, избыточный заряд которых равен

$$dQ = Q_1 nl \cdot dy. \quad (4.75)$$

Заряд одного микровыступа  $Q_1$  определяется формулой (4.68). Согласно (4.9) градиент скорости  $a$  равен  $2V_0/\delta_0$ , где  $\delta_0$  - толщина вязкого подслоя.

$$\delta_0 \approx 3\sqrt{\frac{\nu y}{V_0}}. \quad (4.76)$$

Здесь  $\nu$  - кинематическая вязкость жидкости (для водного электролита  $\nu \approx 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ),  $y$  - расстояние от переднего края пластинки,  $V_0$  - скорость жидкости вдали от поверхности электрода. В результате градиент скорости жидкости у поверхности электрода

$$a \approx 667V_0^{1.5}y^{-0.5}. \quad (4.77)$$

Теперь выражение (4.75) можно записать в виде

$$dQ = 667nl\varepsilon\varepsilon_0\tau L\zeta V_0^{1,5} y^{-0,5} \cdot dy. \quad (4.78)$$

Здесь под размером  $L$  подразумевается размер микровыступа. Избыточный заряд всего электрода

$$Q = \int_0^l dQ \approx 1333n\varepsilon\varepsilon_0\tau L\zeta V_0^{1,5} l^{1,5}. \quad (4.79)$$

За счет этого заряда электрод относительно электролита приобретает потенциал  $\varphi$ . Учитывая, что  $S = l^2$ ,

$$\varphi = \frac{Q}{C_{уд} S} = \frac{1333n\varepsilon\varepsilon_0\tau L\zeta V_0^{1,5}}{C_{уд} \sqrt{l}}, \quad (4.80)$$

где  $C_{уд}$  - удельная емкость электрода, т.е. емкость, приходящаяся на  $1 \text{ м}^2$  площади электрода.

В наших экспериментах по измерению шума движения применялись электроды из нержавеющей стали с контактной площадкой в виде круга диаметром 2,5 мм, а в качестве электролита - раствор NaCl с концентрацией 4,5 г/л. По данным наших измерений (раздел 2.2) удельную емкость электродов из нержавеющей стали можно принять равной  $C_{уд} = 0,02 \text{ Ф/м}^2$ . Для разбавленных водных растворов постоянную времени релаксации двойного слоя обычно считают равной постоянной времени экранирования заряда в электролите  $\tau = \varepsilon\varepsilon_0 / \sigma$ , где  $\sigma$  - удельная электропроводность раствора [56] (Дамаскин). В частности, для раствора NaCl с концентрацией 4,5 г/л при температуре 20 градусов Цельсия  $\sigma = 0,9 \text{ См/м}$ ,  $\tau \approx 8 \cdot 10^{-10} \text{ с}$ . Однако у металлов, применяемых для изготовления электродов (титан, нержавеющая сталь, тантал), двойной слой образуется на поверхности полупроводниковой окисной пленки. В этом случае электрическое поле проникает вглубь полупроводника и в силу его низкой электропроводности процесс релаксации зарядов может протекать значительно медленнее [56] (Дамаскин), то есть величина  $\tau$  может быть существенно больше. Электрокинетический потенциал  $\zeta$  по данным [17] (Богородский) для многих диэлектриков составляет

величину от единиц до десятков милливольт. Определим скачок потенциала электрода  $\Delta\varphi$ , вызванный скачком скорости потока  $\Delta V_0 \ll V_0$ .

$$\Delta\varphi \approx \Delta V_0 \cdot (\varphi)'_{v_0} = \frac{1333n\varepsilon\varepsilon_0\tau L\zeta V_0^{0.5}}{C_{уд}\sqrt{l}} \cdot \Delta V_0 \quad (4.81)$$

Подставим в (4.81) значения:  $\varepsilon = 81$ ,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $l = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $L = 10^{-7}$  м.

Так как  $L = 10^{-7}$  м, то можно считать  $n = 10^{14}$  м<sup>-1</sup>. При  $\tau \approx 8 \cdot 10^{-10}$  с,  $\zeta = 10^{-2}$  В,

$C_{уд} = 0,02$  Ф/м<sup>2</sup> выражение (4.81) имеет вид

$$\Delta\varphi \approx 116 \cdot 10^{-9} V_0^{0.5} \cdot \Delta V_0. \quad (4.82)$$

Как следует из (4.81), чувствительность электрода к пульсациям скорости пропорциональна  $V_0^{0.5}$ . Из формулы (4.81) также следует зависимость скачка потенциала, следовательно, и шума движения от площади электрода. Так как электрод квадратный, то  $l = S^{0.5}$ . Тогда изменение потенциала пропорционально  $S^{-0.25}$ . Оценим величину  $\Delta\varphi$ . Пусть средняя скорость потока жидкости  $V_0 = 0,5$  м/с, а пульсация скорости  $\Delta V_0 = 0,02$  м/с. Амплитуда пульсации электродного потенциала при этом составит 1,63 нВ. Поскольку относительные пульсации скорости жидкости в вязком подслое, прилегающем к поверхности электрода, выше, чем в толще потока [53] (Рейнольдс), следует ожидать, что в действительности пульсация потенциала больше рассчитанной. С учетом возможного увеличения постоянной времени  $\tau$  релаксации двойного слоя на окисной пленке значение пульсации  $\Delta\varphi$  электродного потенциала, соответствующее пульсации скорости 0,05...0,1 м/с, при средней скорости потока порядка 1 м/с может быть больше 10 нВ. Это соответствует порядку величины шума движения, измеренного в разделе 3.2 для длительно выдержанных в электролите электродов.

Как показано в разделе 2.2, емкость датчиков с электродами из разных металлов не перестает изменяться в течение нескольких сотен и даже тысяч часов. Это свидетельствует о непрекращающихся электрохимических процессах на поверхности электродов, влияющих на чувствительность датчика к пульсациям скорости жидкости. При времени выдержки электродов в электролите до нескольких

суток первая составляющая шума движения, вызванная модуляцией толщины диффузионного слоя, при одинаковых пульсациях скорости жидкости существенно больше второй составляющей, обусловленной деформацией двойного электрического слоя. Однако вторая составляющая шума не имеет явной временной и частотной зависимости, поэтому при времени выдержки более нескольких суток она может превысить первую, особенно на частотах выше 30...40 Гц. В соответствии с (4.25) спектр шума, вызванного модуляцией диффузионного слоя, представляет собой произведение спектра пульсаций скорости на коэффициент передачи фильтра нижних частот  $K(\omega) = 1/\sqrt{1 + (\omega\tau_1)^2}$ . Постоянная времени установления параметров пограничного слоя  $\tau_1$  в зависимости от скорости жидкости и размеров электрода может составлять единицы - десятки миллисекунд. Значит, основная энергия этой составляющей шума сосредоточена в диапазоне частот ниже 30 Гц. Расчетное значение пульсаций электродного напряжения достаточно близко к шумовому напряжению, измеренному в наших экспериментах. В разделе 3.2 измерена пульсация электродного потенциала электрода из нержавеющей стали, имеющей близкие с титаном импедансные характеристики. Электрод находился в потоке раствора NaCl со скоростью 0,5 м/с и абсолютным значением пульсации скорости 0,02 м/с. При времени выдержки электрода в электролите 2 сут. измеренное напряжение пульсации составило 11 нВ при концентрации раствора 27 г/л (0,46 моль/л). Наши экспериментальные исследования показали, что электроды из титана имели примерно в 1,5 раза более низкую чувствительность к пульсациям скорости жидкости, чем электроды из нержавеющей стали. Расчет  $\Delta\varphi$  по формуле (4.49) для титанового электрода дает значение  $\Delta\varphi = 3,5$  нВ при относительной диэлектрической проницаемости двойного слоя  $\varepsilon = 81$ . По порядку величины измеренная пульсация электродного потенциала совпадает с расчетной. При этом остается неопределенность в величине диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  в двойном электрическом слое, которая, по-видимому, имеет меньшее значение, что увеличивает значение  $\Delta\varphi$ .

В соответствии с (4.81) составляющая шума движения, связанная с деформацией двойного слоя, уменьшается пропорционально  $S^{0,25}$ . Из (4.49) следует, что модуляционная составляющая шума движения растет пропорционально  $S^{0,25}$ . Однако эти зависимости справедливы только в случае, когда пульсации скорости на всей площади электрода полностью коррелированы. При большой площади электрода это условие обычно не выполняется. Если пульсации скорости жидкости не коррелированы, то пульсации заряда  $\Delta Q$  на разных участках поверхности электрода усредняются, и шум движения имеет тенденцию к уменьшению. В нашем эксперименте, описанном в разделе 3.2, при увеличении площади электродов в 4 раза путем параллельного соединения четырех одинаковых секций спектральная составляющая электродного напряжения на частоте пульсации скорости жидкости уменьшилась на 2 дБ. Таким образом, развитая теория показывает удовлетворительное совпадение с данными экспериментальных исследований. Несмотря на то, что поляризационная составляющая шума имеет небольшую величину, на частотах в несколько десятков герц она может на порядок превышать тепловой шум электродов с площадью более  $50 \text{ см}^2$ , выполненных из тантала, титана и нержавеющей стали.

Присутствующие в электролите ионы хлора вытесняют кислород с некоторых участков поверхности электрода. Поскольку заряд иона хлора меньше, чем заряд иона кислорода, это приводит к смещению потенциала электрода в отрицательную сторону [36] (Скорчеллетти). Но хлор не останавливает процесс окисления электрода, поэтому адсорбция кислорода продолжается. Более того, интенсивное окисление идет на небольших участках поверхности, вследствие чего на поверхности электрода могут появляться изъязвления. При движении жидкости к поверхности электрода приходят порции электролита более или менее богатые кислородом, при этом на некоторых участках поверхности электрода происходит смена процессов адсорбции кислорода и хлора, что приводит к колебаниям потенциала электрода [35] (Фрумкин). Исследования, выполненные диссертантом, показали, что эти колебания имеют случайный характер и влияют на величину



фонового шума [63; 75]. Фоновый шум, как некоррелированный, уменьшается с увеличением площади электрода (раздел 2.1).

### *4.3. Уменьшение шума движения электродного датчика*

Как показано в разделе 4.1, пульсации потенциала электрода относительно воды, то есть электродный шум движения, определяются пульсациями потока диффузии кислорода на поверхность электрода. На поверхности буксируемого со скоростью  $V_0$  плоского электрода формируется пограничный слой, для которого характерны значительные силы трения, замедляющие движение жидкости. Внутри пограничного слоя формируется диффузионный слой, характерный тем, что концентрация атомов кислорода в нем меняется от максимального значения на внешней границе диффузионного слоя до минимального, часто нулевого, значения на поверхности электрода. Пульсации скорости воды относительно электрода приводят к модуляции толщины диффузионного слоя, следовательно, и к пульсациям потока диффузии кислорода. По мере удаления от передней кромки электрода толщина как пограничного, так и диффузионного слоя растет, а ламинарное течение жидкости переходит в турбулентное. При турбулентном движении жидкости в пограничном слое флуктуации потока диффузии возрастают, что приводит к увеличению электродного шума. Необходимо создать условия обтекания, при которых пограничный слой на всей поверхности электрода остается ламинарным. При этом толщина диффузионного слоя должна быть максимально возможной, поскольку это уменьшает градиент концентрации кислорода, что уменьшает скорость диффузии его к поверхности электрода и чувствительность датчика к пульсациям скорости потока. Для обеспечения ламинарности течения максимальное удаление задней границы электрода от передней кромки датчика не должно превышать некоторого критического значения  $l_{кр}$ . Расстояние  $l_{кр}$  можно определить, исходя из критического значения числа Рейнольдса. Если при определении числа Рейнольдса в качестве характерного размера взята толщина пограничного

слоя  $\delta_0$ , а в качестве характерной скорости – скорость жидкости  $V_0$  за пределами пограничного слоя, то  $Re_{кр} = V_0 \delta_0 / \nu = 950$ . Здесь  $\nu$  - кинематическая вязкость воды. Разные оценки толщины пограничного слоя отличаются в несколько раз. Для приведенного значения  $Re_{кр}$  толщина пограничного слоя на расстоянии  $x$  от передней кромки датчика принимается равной [95] (Шлихтинг)

$$\delta_0 = 1,72 \sqrt{\frac{\nu x}{V_0}}. \quad (4.83)$$

В этом случае расстояние  $x = l_{кр}$  от передней кромки датчика до начала образования турбулентных вихрей

$$l_{кр} = 3,05 \cdot 10^5 \nu / V_0. \quad (4.84)$$

При использовании датчика на глубинах до единиц сотен метров в умеренных широтах океана окружающая вода имеет температуру около 15 градусов Цельсия и кинематическую вязкость  $\nu = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$ . При скорости буксировки  $V_0 = 5 \text{ м/с}$  получаем  $l_{кр} = 6,7 \text{ см}$ . В Черном море на глубине 100 м и более вода имеет температуру в любое время года равную 8 градусам Цельсия и вязкость  $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$ , что увеличивает  $l_{кр}$  до 8 см. В полярных широтах океана, особенно в зимнее время, температура еще ниже, а вязкость выше. Здесь значение  $l_{кр}$  достигает 10 см и более. По другой оценке толщина пограничного слоя равна

$$\delta_0 = 5 \sqrt{\frac{\nu x}{V_0}}, \quad (4.85)$$

а  $Re_{кр} = 3,2 \cdot 10^5$ , при этом за характерный размер принимается расстояние  $x$  от передней кромки [95] (Шлихтинг). Полагая  $l_{кр} = x$ , при  $V_0 = 5 \text{ м/с}$  и  $\nu = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$ , получаем  $l_{кр} \approx 7 \text{ см}$ , то есть практически то же значение, что и выше. Эта величина является нижней оценкой расстояния до начала образования турбулентных вихрей.

Пусть электрод в виде прямоугольной плоской пластины встроен в диэлектрическую плоскую поверхность обтекателя так, что его передняя граница с дли-

ной  $a$  параллельна передней кромке диэлектрической поверхности и отстоит от нее на расстояние  $l_1$ , а задняя граница - на расстояние  $l_2$  (рис.1). Поток диффузии кислорода на электрод [94] (Левич)

$$I = \int_{l_1}^{l_2} a \frac{Dc_0}{\delta(x)} dx. \quad (4.86)$$

Здесь  $\delta(x) \approx 3 \left( \frac{D}{\nu} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{\nu x}{V_0}}$  - толщина диффузионного слоя, которая существенно меньше толщины пограничного слоя,  $D = 2,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  - коэффициент диффузии атомов кислорода,  $c_0$  - концентрация кислорода в толще электролита. Определим поток диффузии кислорода на электрод в двух случаях: когда он установлен на диэлектрической поверхности, как указано выше, и когда он установлен непосредственно на краю плоской поверхности диэлектрического обтекателя, так что его передняя граница совпадает с передней кромкой обтекателя со стороны набегающего потока жидкости. В первом случае:

$$I_1 = ac_0 \frac{D^{\frac{2}{3}}}{3\nu^{\frac{1}{6}}} \sqrt{V_0} \int_{l_1}^{l_2} \frac{dx}{\sqrt{x}} = \frac{2ac_0 D^{\frac{2}{3}}}{3\nu^{\frac{1}{6}}} \sqrt{V_0 l_2} \left( 1 - \sqrt{\frac{l_1}{l_2}} \right). \quad (4.87)$$

Во втором случае:

$$I_2 = ac_0 \frac{D^{\frac{2}{3}}}{3\nu^{\frac{1}{6}}} \sqrt{V_0} \int_0^{l_2} \frac{dx}{\sqrt{x}} = \frac{2ac_0 D^{\frac{2}{3}}}{3\nu^{\frac{1}{6}}} \sqrt{V_0 l_2}. \quad (4.88)$$

Чувствительность датчика к пульсациям скорости потока или скорости буксировки в первом случае уменьшилась по сравнению со вторым во столько же раз, во сколько уменьшился поток диффузии кислорода на электрод, т.е. в  $I_2/I_1 = 1/(1 - \sqrt{l_1/l_2})$  раз. Целесообразно при сохранении общей площади электрод делать более узким, отодвигая его переднюю границу от передней кромки диэлектрической пластины. При  $l_1/l_2 = 0,25$  выигрыш в уменьшении чувствительности к пульсациям скорости составляет 2 раза, а при  $l_1/l_2 = 0,8$  - уже около 10 раз.

Дальнейшее увеличение отношения  $l_1/l_2$  может привести к уменьшению площади электрода и увеличению доли тех шумов, которые не определяются пульсациями скорости буксировки.

Площадь электрода необходимо выбирать исходя из предельной чувствительности приемного устройства, которая определяется тепловым шумом датчика и собственным шумом предварительного усилителя приемного устройства. Предельная чувствительность приемного устройства с датчиком есть минимальная величина напряженности электрического поля сигнала, при которой отношение мощности сигнала к суммарной мощности теплового шума датчика и шума усилителя, приведенного ко входу приемного устройства, равно единице при оптимальном согласовании датчика. При полосе пропускания 1 Гц она определяется по формуле (2.21):

$$E_{\min} = \frac{1}{d} \sqrt{4kTR \left[ F_{\text{тр}} + (F_{\text{усмин}} - 1) \sqrt{F_{\text{тр}}^2 + \frac{1}{\omega^2 \tau^2}} \right]},$$

где  $d$  - действующая длина датчика,  $\tau = RC$  - постоянная времени датчика,  $R$  и  $C$  - активное сопротивление и емкость датчика в последовательной схеме замещения,  $F_{\text{усмин}}$  - минимальный коэффициент шума усилителя,  $F_{\text{тр}}$  - коэффициент шума трансформатора. Ориентируясь на чувствительность приемника с часто применяемым кабельным электродным датчиком, которая в полосе 1 Гц достигает долей нВ/м при длине активной части до 1000 м, положим  $E_{\min} < 1$  нВ/м.

Определим размеры датчика, удовлетворяющего такому условию. Пусть датчик выполнен в виде диэлектрического обтекателя с плоской прямоугольной поверхностью, на которой установлены два плоских электрода (рисунок 4.5). Прямоугольные электроды, выполненные из титана, имеют длину  $a = 20$  см и ширину  $b = 2$  см и расположены на расстоянии 2 метра друг от друга, будучи встроены в пластину заподлицо. Задняя граница электрода отстоит от передней кромки обтекателя на 8 см. Сопротивление датчика в этом случае по данным раздела 2.2 в диапазоне частот 30...90 Гц составляет 4...5 Ом, а емкость – 250...280 мкФ.

Действующую длину можно считать равной 2 м,  $\omega\tau \approx 0,4..0,6$ . Не накладывая слишком жестких требований к коэффициенту шума предварительного усилителя и входного трансформатора, согласующего датчик с предусилителем, полагаем  $F_{тр} = 2$  дБ,  $F_{усмин} = 2$  дБ. Предельная чувствительность для приемного устройства с таким датчиком имеет величину порядка 0,25 нВ/м, что удовлетворяет поставленному условию  $E_{мин} < 1$  нВ/м. Выбранный размер электродов позволяет осуществить условие  $l_1/l_2 = 0,75$ , следовательно, добиться уменьшения в 7,5 раз чувствительности датчика к пульсациям скорости набегающего потока.

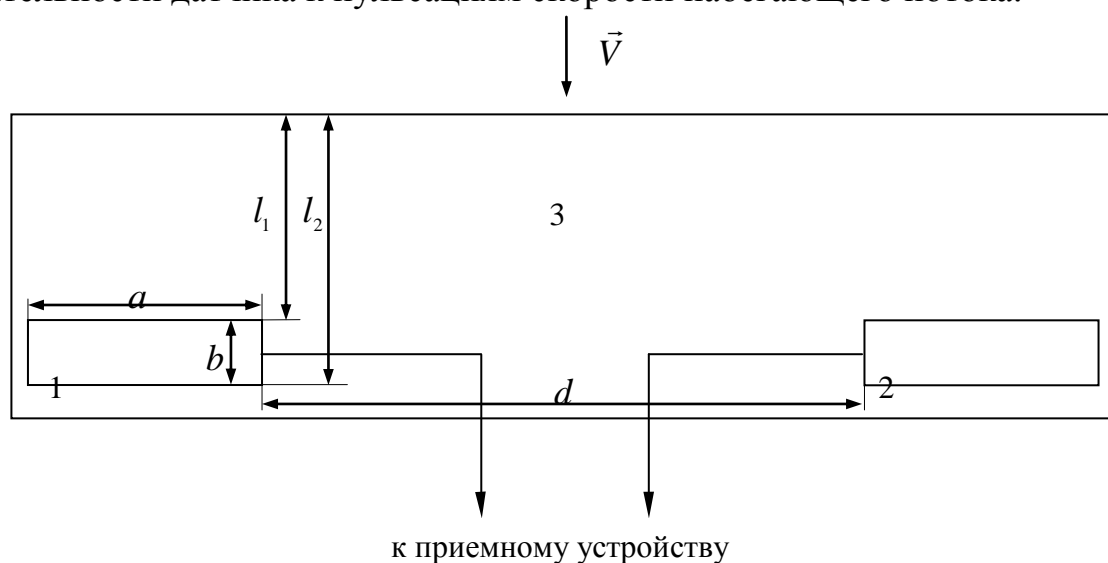


Рисунок 4.5 - Схема расположения электродов на обтекателе морского датчика. 1,2 – электроды, 3 – диэлектрический обтекатель. Стрелкой показано направление набегающего потока жидкости

Для проверки правильности приведенных рассуждений выполнен эксперимент, в котором использована лабораторная установка, описанная в разделе 3.2 (рисунок 3.16). Схема измерительной ячейки, использованной в эксперименте, показана на рисунке 4.6. Исследуемые электроды 1 и 2 выполнены в виде отрезков титановой проволоки диаметром 1 мм и встроены в диэлектрический цилиндр 3 диаметром 11 мм, отлитый из эпоксидной смолы. Вместе с цилиндром 3 они образуют электродный блок, который установлен на корпусе ячейки 4, изготовленном из органического стекла. Ячейка без воздушных пузырей заполнена электролитом, кото-

рый через инжектор 5 по гибкому трубопроводу 6 подается в измерительную ячейку и отводится из нее с помощью уловителя потока 7. Для создания пульсаций потока жидкости электродвигатель насоса питается от аккумулятора через электронный ключ, который управляется импульсами, следующими с частотой 30... 32 Гц, их скважность можно регулировать. Шлифованные торцы отрезков

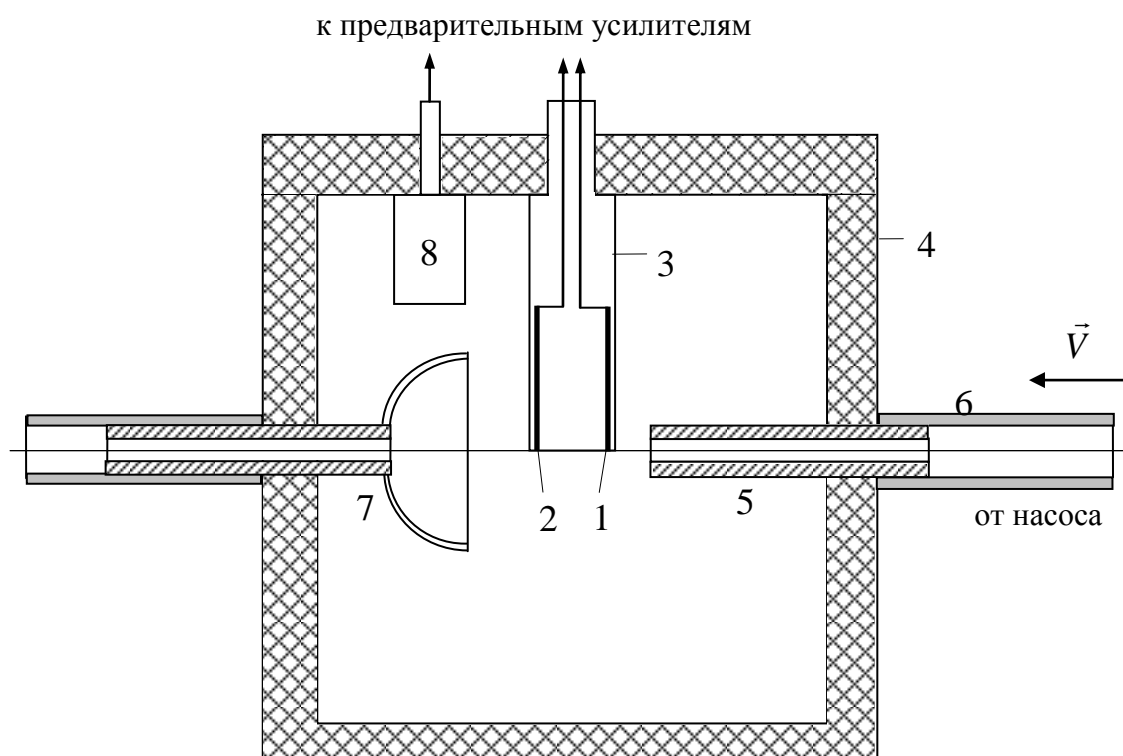


Рисунок 4.6 - Схема измерительной ячейки с электродами. 1,2 – первый и второй электроды, 3 – диэлектрический цилиндр, 4 – корпус ячейки, 5 – инжектор, 6 - трубопровод, 7 - уловитель потока, 8 – опорный электрод

титановой проволоки, которые и являются собственно измерительными электродами, встроены заподлицо в плоскую торцевую площадку диэлектрического цилиндра (рисунок 4.7), на которую набегаёт поток электролита, имитирующий морскую воду. Первый электрод 1 находится на краю площадки на расстоянии 4 мм от инжектора. Второй электрод 2 на 10 мм отодвинут от первого по направлению потока, то есть располагается на противоположном краю площадки. Так как центр второго электрода 2 удален от края площадки, на который набегаёт поток жидкости, на расстояние в 10 раз большее, чем центр первого электрода 1, то

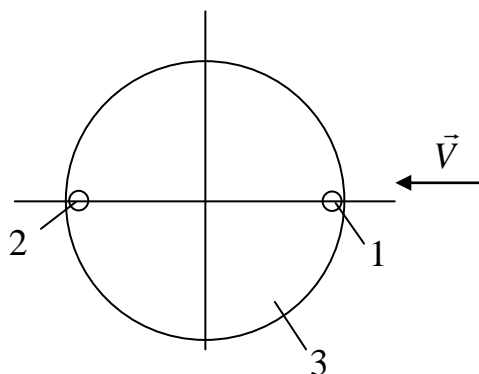


Рисунок 4.7 - Схема расположения измерительных электродов на торцевой площадке электродного блока. 1 – первый электрод, 2 – второй электрод

чувствительность его к пульсации скорости должна быть в соответствии с (4.87) и (4.88) примерно в три раза меньше, чем у первого. В качестве электролита использован раствор NaCl с концентрацией 4,5 г/л, средняя скорость потока жидкости в экспериментах составляла около 0,8 м/с. Она зависит от величины напряжения питания электродвигателя центробежного насоса и скважности импульсов, управляющих электронным ключом. Скважность выбиралась такой, чтобы пульсация скорости потока на частоте 31 Гц была хорошо заметна по характерному пику в спектре электродного шума. Величина пульсации скорости не измерялась, но по оценкам ее относительная величина составляла десятые доли процента. Шумовые напряжения, возникающие между каждым из электродов 1,2 и опорным электродом 8, расположенным в стороне от потока в той же измерительной ячейке, усиленные предварительными и измерительными усилителями, поступали на два канала аналого-цифрового преобразователя E20-10 фирмы L-Card. Электрод 8 имеет большую площадь и выполнен из нержавеющей стали. Одновременно записывались серии из 20 реализаций напряжения, с помощью программы L-Graf вычислялись амплитудные спектры реализаций, которые затем усреднялись по ансамблю. На рисунках 4.8 и 4.9 в сопоставимом относительном масштабе показаны измеренные одновременно в отсутствие движения и при движении жидкости частотные спектры шумового напряжения первого и второго электродов на выходе измерительных усилителей в полосе 10...100 Гц. Приведенные спектры

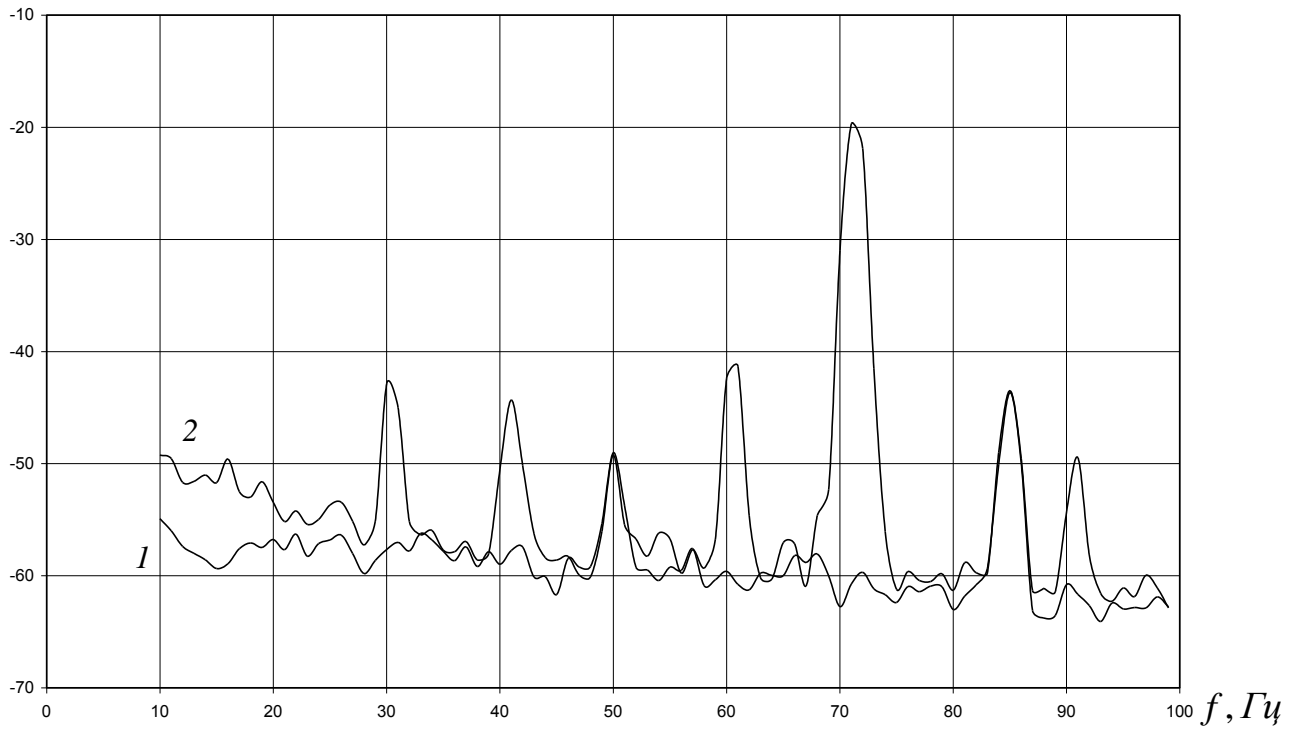
$U, \text{дБ}$ 

Рисунок 4.8 - Спектр шумового напряжения с первого электрода. 1 - в отсутствие движения жидкости, 2 - при движении жидкости

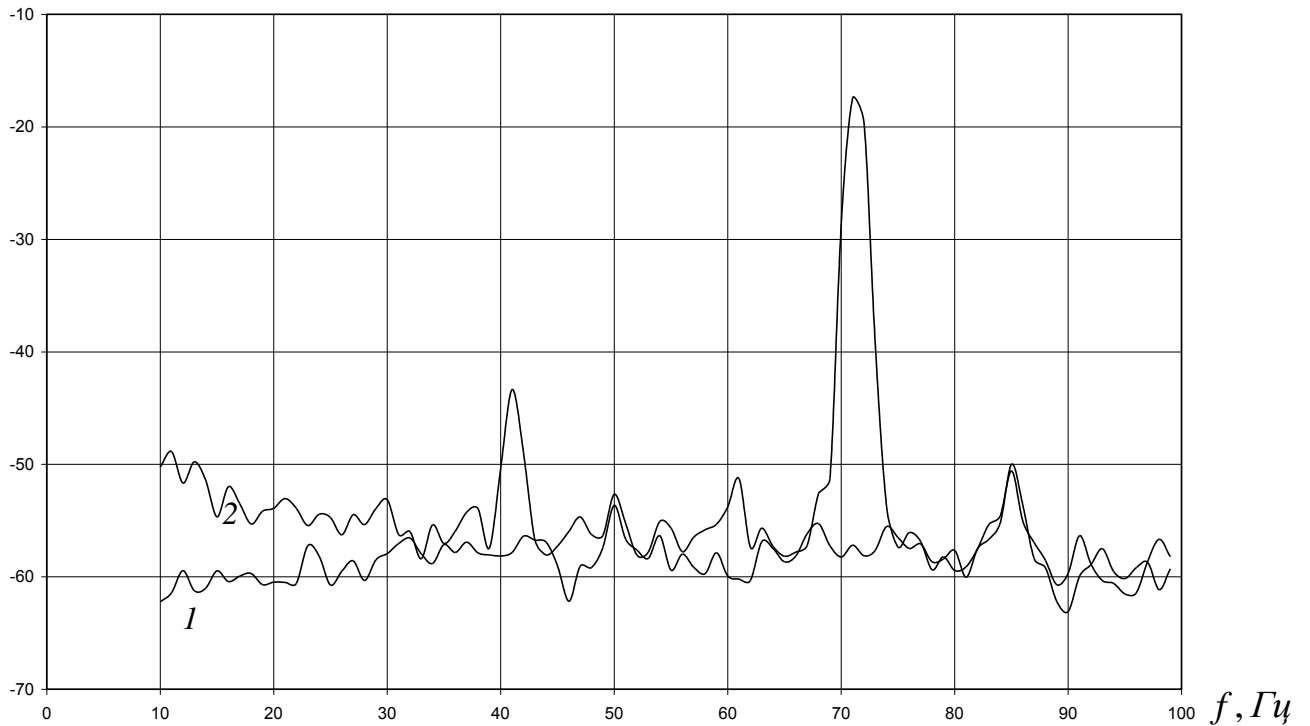
 $U, \text{дБ}$ 

Рисунок 4.9 - Спектр шумового напряжения со второго электрода. 1 - в отсутствие движения жидкости, 2 - при движении жидкости



являются типичными для выполненных измерений. На рисунке 4.8 показан спектр шумового напряжения с первого электрода 1 в отсутствие движения и при движении электролита. Спектр при движении электролита имеет изрезанный вид. Он имеет пики на частотах 30, 61 и 91 Гц, соответствующие частоте пульсации средней скорости потока и ее гармоникам, высота которых на 12...18 дБ превышает средние значения спектральной плотности шума в окрестностях пиков. Спектр шумового напряжения со второго электрода 2 (рисунок 4.9) при движении электролита более гладкий. Пики на частотах 30, 61 и 91 Гц выражены слабо. Их высота на частотах 30 и 61 Гц на 10 дБ, а на частоте 91 Гц на 7 дБ ниже, чем в спектре первого электрода. Полученный для второго электрода 2 выигрыш по шуму совпадает с расчетным. Подобная картина наблюдалась во всех сеансах измерения. На всех измеренных автором спектрах электродного шума у электрода 2 высота пика на частоте пульсации скорости жидкости 30...31 Гц была на 7...13 дБ ниже, чем у электрода 1. Результаты эксперимента подтверждают правильность теории электродного шума, развитой в разделе 4.1. Эксперимент показал, что электродный шум движения датчика при его буксировке можно уменьшить в несколько раз выбором расположения электрода на плоской диэлектрической поверхности обтекателя. Однако следует иметь в виду, что при движении датчика в области с сильной турбулентностью, например, при пересечении кильватерного следа, достичь существенного уменьшения шума движения вряд ли удастся. Кроме пиков на частоте контролируемой пульсации скорости потока жидкости и ее гармониках, в спектрах на рисунках 4.8 и 4.9 наблюдаются пики на других частотах. На частоте 50 Гц пик обусловлен проникновением в измерительный канал наводки от промышленной электрической сети. Пик на частоте 85 Гц присутствует в спектре электродного шума и при выключенном насосе, поэтому не связан с движением жидкости и представляет собой помеху неизвестного происхождения. Пики на частотах 41 и 71 Гц возникают только при работе центробежного насоса, приводящего жидкость в движение. При увеличении скорости вращения электромотора насоса эти пики смещаются в сторону более высоких частот. Высота этих пиков в спектрах шума электродов № 1 и № 2 практически одинакова. На рисунке

4.10 показаны спектры напряжения с выхода датчика скорости жидкости, встроенного в трубопровод перед измерительной ячейкой, при двух скоростях движения жидкости. В спектре пульсаций скорости хорошо заметен пик на частоте работы электронного ключа 31 Гц, а на частотах 41 и 71 Гц пики не обнаружены.

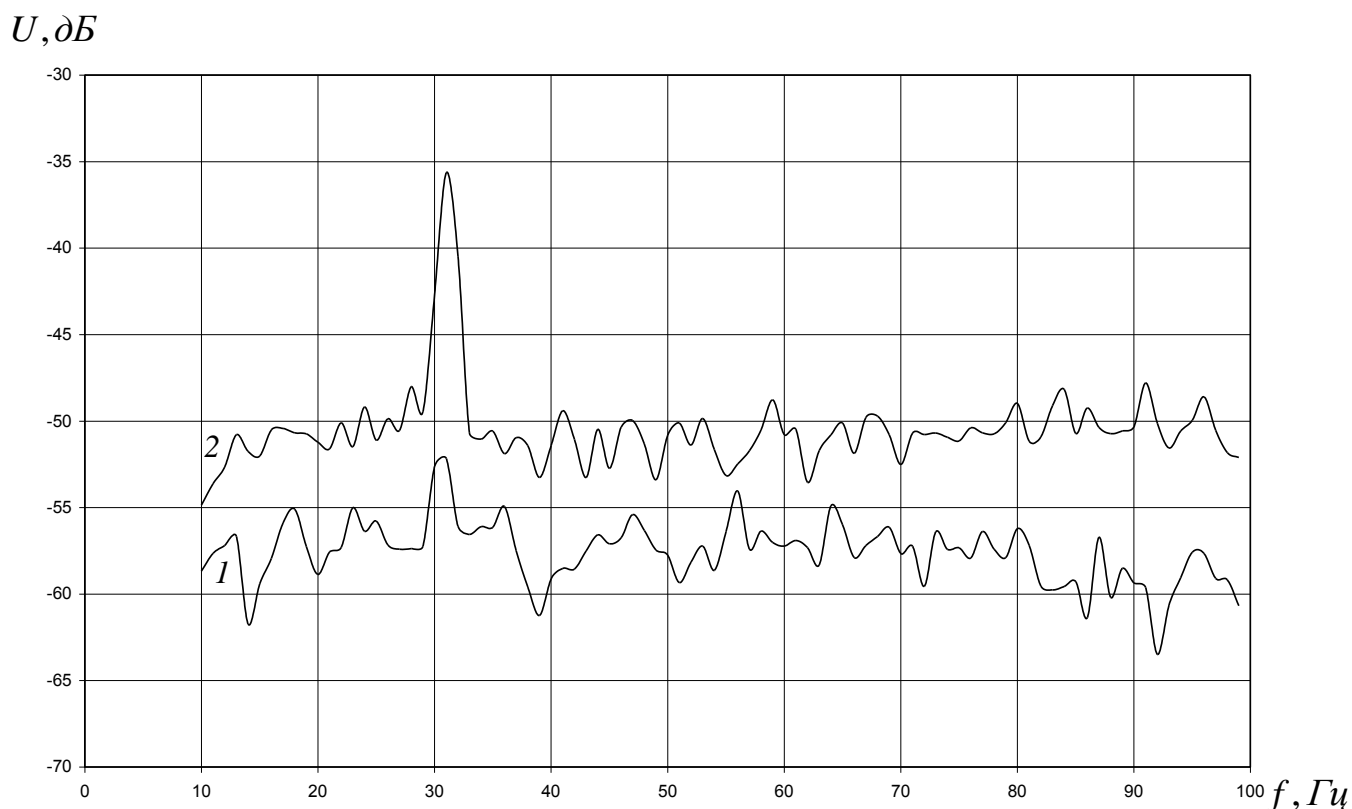


Рисунок 4.10 - Спектр напряжения на выходе датчика скорости жидкости. 1 – при скорости 0,8 м/с. 2 – при скорости 1,1 м/с

Следовательно, они представляют собой помеху от электродвигателя, возникающую по причине несовершенства экранирования измерительной ячейки. В промежутках между пиками оба электрода показывают близкие значения спектральной плотности шума. Спектры шума электродов 1 и 2 в отсутствие движения мало отличаются друг от друга. На частотах ниже 35 Гц спектральная плотность шума при движении электролита выше, чем в отсутствие движения, это превышение достигает 8...10 дБ на частоте 10 Гц. Исследуемые электроды находились в элек-

тролите более 60 суток. Как известно из раздела 3.2, при уменьшении времени выдержки электродов в электролите указанное превышение существенно больше и заметно в более широкой полосе частот.

#### 4.4. Вращающийся электрод в электродном датчике

Чувствительность электрода к пульсациям скорости является существенным недостатком. Покажем, что это его свойство можно использовать для уменьшения шума движения и повышения чувствительности электродного датчика. В разделе 4.1 установлено, что пульсации потенциала электрода вызваны пульсациями заряда поверхности, которые, в основном, определяются пульсациями потока диффузии кислорода на поверхность электрода. Предположим, что электрод имеет две электрически соединенные плоские площадки, движущиеся с одинаковой скоростью  $U$  в противоположные стороны: одна движется навстречу набегающему потоку жидкости, а вторая – по направлению потока. Вектор скорости  $V_0$  набегающего потока направлен вдоль поверхности площадок, которые имеют форму квадрата со стороной  $a$ . В результате первая из них имеет скорость относительно жидкости  $U+V_0$ , а вторая -  $U-V_0$ . Полагаем, что  $U \gg V_0$ . Толщина диффузионного слоя на гладкой пластинке, на край которой набегают вдоль поверхности ламинарный поток электролита со скоростью  $V$  [94] (Левич),

$$\delta \approx 0,3\sqrt{l\nu/V}, \quad (4.89)$$

где  $l$  - расстояние от передней кромки пластинки до точки наблюдения,  $\nu$  - кинематическая вязкость электролита. У водного электролита  $\nu \approx 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Плотность потока  $j$  диффундирующего кислорода (моль/с · м<sup>2</sup>) зависит от градиента концентрации кислорода в диффузионном слое электролита, который можно считать равным отношению концентрации кислорода в толще электролита к толщине диффузионного слоя [94].

$$j = D \frac{dc}{dz} \approx D \frac{c_0}{\delta}. \quad (4.90)$$

В соответствии с (4.89) и (4.90) поток кислорода, диффундирующего из толщи электролита к поверхности двух контактных пластин (моль/с)

$$I = 3,33Dac_0 \int_0^a \left( \sqrt{\frac{U+V_0}{\nu}} + \sqrt{\frac{U-V_0}{\nu}} \right) \frac{dx}{\sqrt{x}} = 6,66Dac_0 \sqrt{\frac{a}{\nu}} \left( \sqrt{U+V_0} + \sqrt{U-V_0} \right) \quad (4.91)$$

При скачке скорости  $\Delta V_0 \ll V_0$  ( $U \gg V_0$ ) получим скачок потока диффузии кислорода (здесь мы не учитываем инерционность гидромеханических и электрохимических процессов)

$$\Delta I = -3,33Dac_0 \sqrt{\frac{a}{\nu}} \frac{V_0}{U^{1,5}} \Delta V_0 \quad (4.92)$$

В отсутствие вращения электрода поток кислорода

$$I = 13,33Dac_0 \sqrt{\frac{aV_0}{\nu}}, \quad (4.93)$$

Скачок потока, соответствующий скачку скорости  $\Delta V_0$ ,

$$\Delta I = 6,67Dac_0 \sqrt{\frac{a}{\nu V_0}} \Delta V_0. \quad (4.94)$$

Как видно из (4.92) и (4.94) при вращении электрода абсолютная пульсация потока, следовательно, и пульсация потенциала электрода, уменьшилась в  $2(U/V_0)^{1,5}$  раз. При  $U = 10V_0$  это уменьшение составляет 63 раза.

С некоторым приближением реализовать противоположное движение электроконтактных площадок одного электрода позволяет вращающийся электрод. В простейшем случае электрод выполнен в виде двух плоских контактных площадок, установленных на концах электропроводящей перекладины, вращающейся вокруг оси, проходящей через ее середину. Но форма площадок не обязательно должна быть квадратной. На рисунке 4.11 изображен вращающийся электрод с контактными площадками в форме круга. При вращении перекладины в силу круглой формы площадок гидродинамика обтекания пластинки не меняется. Изменяется лишь модуль скорости жидкости относительно поверхности площадки. На электрод набегают поток жидкости со скоростью  $V_0$ , вектор которой параллелен плоскости контактных площадок. Рассмотрим движение электролита относи-

тельно одной контактной площадки в отсутствие вращения перекладины (рисунок 4.12). Расстояние от края площадки до произвольной точки  $M(x;y)$  в направлении

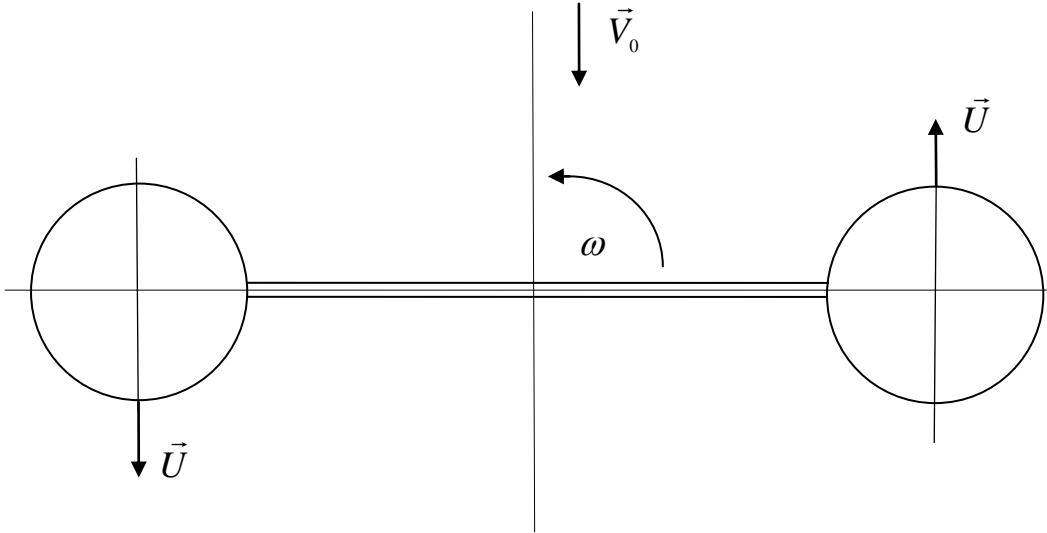


Рисунок 4.11 - Вращающийся электрод с контактными площадками в форме круга

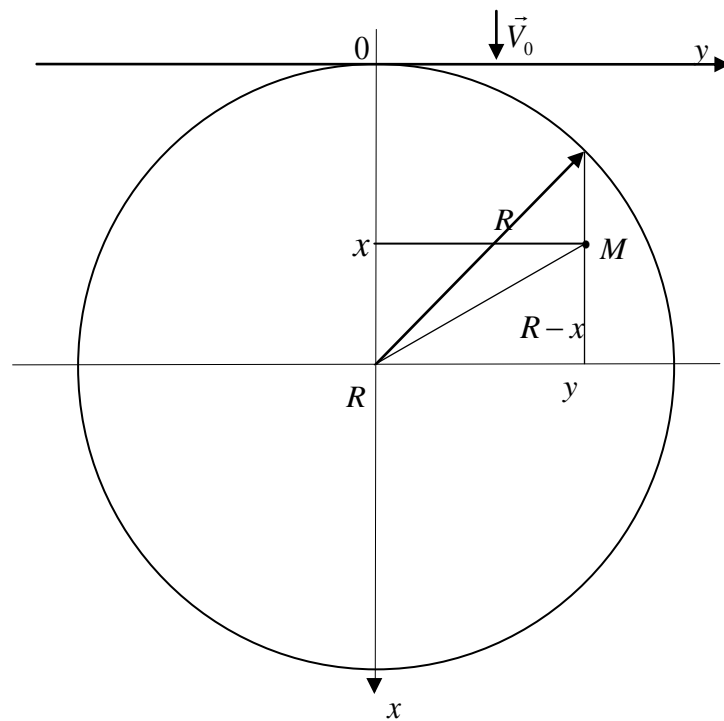


Рисунок 4.12 - Контактная площадка в потоке электролита

оси  $x$  равно  $\sqrt{R^2 - y^2} + x - R$ . Заряд поверхности площадки электрода определяется количеством адсорбированных атомов кислорода, которое в свою очередь определяется величиной потока диффузии кислорода на поверхность электрода. Толщина диффузионного слоя на гладкой пластинке, на край которой набегают поток электролита со скоростью  $\vec{V}_0$ , определяется формулой (4.89), где  $V = V_0$ . В нашем случае толщина диффузионного слоя в точке  $M(x; y)$

$$\delta(x; y) = 0,3 \sqrt{\frac{\nu(\sqrt{R^2 - y^2} + x - R)}{V_0}}. \quad (4.95)$$

Рассмотрим диффузию кислорода к одной стороне плоского электрода. Плотность потока диффузии кислорода к поверхности диска

$$j(x; y) = \frac{Dc_0}{\delta(x; y)} = 3,33 Dc_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sqrt{R^2 - y^2} + x - R}}. \quad (4.96)$$

Поток диффузии на весь электрод

$$\begin{aligned} I &= 2 \int_0^R \int_{R-\sqrt{R^2-y^2}}^{R+\sqrt{R^2-y^2}} j(x; y) dx dy = 6,67 Dc_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu}} \int_0^R \int_{R-\sqrt{R^2-y^2}}^{R+\sqrt{R^2-y^2}} \frac{dx dy}{\sqrt{\sqrt{R^2 - y^2} + x - R}} = \\ &= 18,85 Dc_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu}} \int_0^R \sqrt[4]{R^2 - y^2} dy. \end{aligned} \quad (4.97)$$

Применив тригонометрическую подстановку  $y = R \cos \varphi$ , приведем интеграл к табличному виду, выражающемуся через гамма-функцию.

$$\begin{aligned} I &= 18,85 Dc_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu}} R^{1,5} \int_0^{\pi/2} (\sin \varphi)^{1,5} d\varphi = 18,85 Dc_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu}} R^{1,5} \frac{\pi}{2} \Gamma\left(\frac{5}{4}\right) \approx \\ &\approx 15,14 Dc_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu}} R^{1,5}. \end{aligned} \quad (4.98)$$

Сравнивая полученное значение с потоком на квадратный электрод той же площади (вектор скорости перпендикулярен к стороне квадрата), можно убедиться,

что последний больше всего на 3,6%, т.е. они практически равны. Пульсация потока кислорода при пульсации скорости жидкости  $\Delta V_0$

$$\Delta I = 7,57 D c_0 R \sqrt{\frac{R}{\nu V_0}} \Delta V_0. \quad (4.99)$$

Найдем эффективную толщину диффузионного слоя, полагая, что на всей площади круглого дискового электрода она одинакова.

$$\delta_{\text{эфф}} = D c_0 \pi R^2 / 15,14 D c_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu}} R^{1,5} = 0,21 \sqrt{\frac{\nu R}{V_0}}. \quad (4.100)$$

Вычислим поток диффузии кислорода на всю поверхность электрода. Рассмотрим положение перекладки, при котором первая контактная площадка со скоростью  $U$  движется навстречу потоку, а вторая – с такой же скоростью по направлению потока. Первая из них имеет скорость относительно жидкости  $U+V_0$ , а вторая  $U-V_0$ . Полагаем, что  $U \gg V_0$ . В соответствии с (4.98) поток кислорода, диффундирующего из толщи электролита к поверхности двух контактных площадок (моль/с)

$$I = 15,14 D R c_0 \sqrt{\frac{R}{\nu}} (\sqrt{U+V_0} + \sqrt{U-V_0}). \quad (4.101)$$

При скачке скорости  $\Delta V_0 \ll V_0$  ( $U \gg V_0$ ) получим скачок потока кислорода (здесь мы не учитываем инерционность гидромеханических и электрохимических процессов)

$$\Delta I = -7,57 D R c_0 \sqrt{\frac{R}{\nu}} \frac{V_0}{U^{1,5}} \Delta V_0. \quad (4.102)$$

В отсутствие вращения электрода поток кислорода на обе площадки

$$I = 30,28 D R c_0 \sqrt{\frac{R V_0}{\nu}}, \quad (4.103)$$

Скачок потока, соответствующий скачку скорости  $\Delta V_0$ ,

$$\Delta I = 15,14DRc_0 \sqrt{\frac{R}{\nu V_0}} \Delta V_0. \quad (4.104)$$

Сравнивая (4.102) и (4.104), видим, что при вращении электрода абсолютная пульсация потока, следовательно, и пульсация потенциала электрода, уменьшилась в  $2(U/V_0)^{1,5}$  раз. При  $U = 10V_0$  это уменьшение составляет 63 раза.

Рассмотрим положение перекладины, при котором контактные площадки движутся перпендикулярно к вектору скорости набегающего потока электролита. В этом случае в формулу (4.98) вместо  $V_0$  следует подставить  $\sqrt{V_0^2 + U^2}$ . Поток кислорода на обе контактные площадки

$$I = 30,28Rc_0 \sqrt{\frac{R}{\nu}} \cdot \sqrt[4]{U^2 + V_0^2}, \quad (4.105)$$

а изменение потока на обе площадки, вызванное скачком скорости  $\Delta V_0 \ll U$ ,

$$\Delta I = 15,14DRc_0 \sqrt{\frac{R}{\nu}} \frac{V_0}{\sqrt[4]{(U^2 + V_0^2)^3}} \Delta V_0 \approx 15,14DRc_0 \sqrt{\frac{R}{\nu}} \frac{V_0}{U^{1,5}} \Delta V_0. \quad (4.106)$$

Как видно из сравнения (4.104) и (4.106), пульсации потенциала электрода уменьшились в  $(\frac{U}{V_0})^{1,5}$ , что составляет 31,5 раз. В среднем выигрыш по шуму движения для вращающегося электрода в рассмотренном примере составляет около 50 раз.

Более интересной для практического применения является форма электрода в виде кольца или диска. Пусть электрод выполнен в форме узкого кольца с внешним радиусом  $R$  и внутренним радиусом  $0,9R$ . Найдём поток диффузии кислорода на неподвижное кольцо, на которое вдоль оси  $x$  (рисунок 4.13) набегают поток электролита со скоростью  $\vec{V}_0$ . Разделим кольцо на четыре части. Две из них – это правый и левый сегменты, ограниченные хордами, проходящими по внутренней стороне кольца. Две другие – это верхняя и нижняя часть кольца, отсечен-



ная хордами. Условия обтекания их можно считать одинаковыми, поскольку кольцо узкое. Также одинаковы и условия обтекания сегментов. Найдем поток диффузии на верхнюю часть кольца, обозначенную на рисунке 4.13 цифрой 1. Произвольная точка  $M(x;y)$  отстоит от верхнего края кольца по направлению вектора  $\vec{V}_0$  на расстояние  $\sqrt{R^2 - y^2} + x - R$ . Толщина диффузионного слоя в точке  $M(x;y)$  определяется выражением (4.95). Поток диффузии кислорода на верхнюю часть кольца определяется таким же интегралом, что и (4.97), только с другими пределами интегрирования.

$$I_1 = 6,67 D c_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu}} \int_0^{0,9R} \int_{R-\sqrt{R^2-y^2}}^{R-\sqrt{0,81R^2-y^2}} \frac{dx dy}{\sqrt{\sqrt{R^2 - y^2} + x - R}} \approx 4,325 D c_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu R}} R^2. \quad (4.107)$$

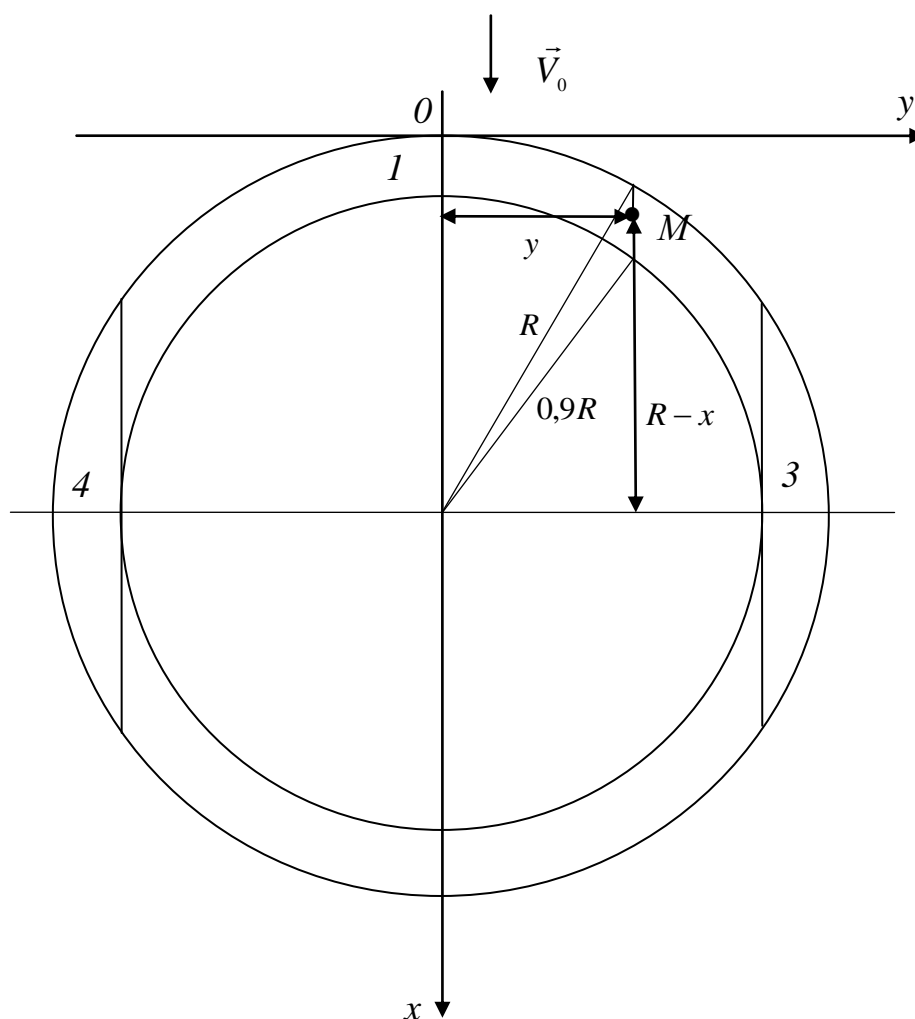


Рисунок 4.13 - Неподвижный электрод в форме кольца

Поток диффузии на обе части кольца, верхнюю и нижнюю, в два раза больше

$$I_1 + I_2 = 8,65 D c_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu R}} R^2. \quad (4.108)$$

Найдем поток диффузии на правый сегмент, обозначенный цифрой 3. Он тоже определяется интегралом (4.97), но с другими пределами интегрирования.

$$I_3 = 6,67 D c_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu}} \int_{0,9R}^R \int_{R-\sqrt{R^2-y^2}}^{R+\sqrt{R^2-y^2}} \frac{dx dy}{\sqrt{\sqrt{R^2-y^2} + x - R}} \approx 18,85 D c_0 \sqrt{R} \sqrt{\frac{V_0}{\nu}} \int_{0,9R}^R \sqrt{1 - \left(\frac{y}{R}\right)^2} dy.$$

Сделав замену  $y/R = \cos \varphi$ , получим

$$I_3 \approx 18,85 D c_0 R \sqrt{R} \sqrt{\frac{V_0}{\nu}} \int_0^{0,451} (\sin \varphi)^{1,5} d\varphi = D c_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu R}} R^2. \quad (4.109)$$

Поток  $I_4$  на левый сегмент такой же. Поток диффузии на все кольцо

$$I \approx 9,65 D c_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu R}} R^2. \quad (4.110)$$

Пульсация потока диффузии при пульсации скорости жидкости  $\Delta V_0$

$$\Delta I \approx 4,8 D c_0 R \sqrt{\frac{R}{\nu V_0}} \Delta V_0. \quad (4.111)$$

Рассмотрим теперь диффузию кислорода на кольцевой электрод, вращающийся с угловой скоростью  $\omega$  в неподвижной жидкости. В системе отсчета, связанной с кольцом, жидкость вращается относительно него с той же угловой скоростью в противоположную сторону. Расстояние от произвольной точки  $M$ , расположенной на расстоянии  $r$  от центра кольца, до внешнего края кольца по направлению вектора  $\vec{U}$  скорости жидкости относительно электрода (по перпендикуляру к радиусу  $OM$ ) равно  $\sqrt{R^2 - r^2}$  (рисунок 4.14). При этом модуль вектора скорости жидкости  $U = \omega r$ . В соответствии с (4.89) толщина диффузионного слоя

$$\delta \approx 0,3 \sqrt{\frac{\nu \sqrt{R^2 - r^2}}{\omega r}}. \quad (4.112)$$

Поток диффузии на элементарную площадку  $r dr d\varphi$  в окрестностях точки  $M$

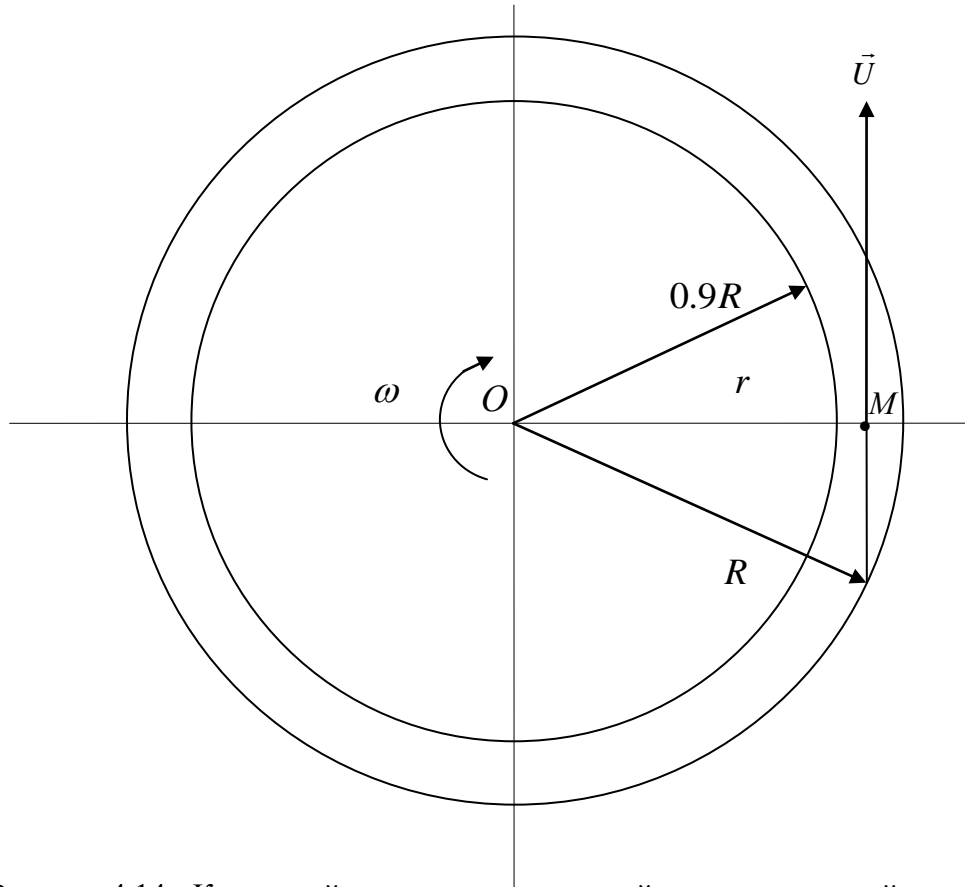


Рисунок 4.14 - Кольцевой электрод, вращающийся в неподвижной жидкости

$$dI = \frac{Dc_0}{\delta} r dr d\varphi = 3,33 Dc_0 \sqrt{\frac{\omega r}{\nu \sqrt{R^2 - r^2}}} r dr d\varphi. \quad (4.113)$$

Поток диффузии на весь кольцевой электрод

$$\begin{aligned} I_{\kappa} &= 4 Dc_0 \int_0^{\pi/2} \int_{0,9R}^R \frac{r dr d\varphi}{\delta} = 13,33 Dc_0 \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \int_0^{\pi/2} \int_{0,9R}^R \sqrt{\frac{r}{\sqrt{R^2 - r^2}}} r dr d\varphi = \\ &= 3,93 Dc_0 R^2 \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}. \end{aligned} \quad (4.114)$$

Эффективная толщина диффузионного слоя на кольцевом вращающемся электроде с внутренним радиусом  $0,9 R$

$$\delta = \frac{Dc_0 S}{I_{\kappa}} \approx 0,15 \sqrt{\frac{\nu}{\omega}}. \quad (4.115)$$

Сравним полученную формулу (4.108) с потоком  $I_{\text{д}}$  на диск радиуса  $R$ , известным из [94]. Получаем  $I_{\kappa} / I_{\text{д}} = 0,285$ , т.е. наш результат не противоречит известному.

Отношение потока диффузии на вращающееся кольцо к потоку на такой же неподвижный электрод в соответствии с (4.110) и (4.114) равно  $0,4\sqrt{\omega R/V_0}$ . При высокой скорости вращения это отношение больше единицы вследствие уменьшения толщины диффузионного слоя.

Пусть теперь на вращающийся кольцевой электрод набегают поток электролита, имеющий скорость  $V_0$  и пульсацию скорости  $\Delta V_0$ . Вектор  $\vec{V}$  скорости жидкости относительно электрода в точке  $M$  определяется суммой вектора  $\vec{U}$  скорости неподвижной жидкости относительно электрода и вектора  $\vec{V}_0$  скорости набегающего на электрод потока. Из треугольника скоростей в соответствии с рисунком 4.15 по теореме синусов

$$\frac{V}{\cos\varphi} = \frac{V_0}{\sin\alpha},$$

где  $V$  - скорость жидкости относительно электрода в точке  $M$ . По теореме косинусов

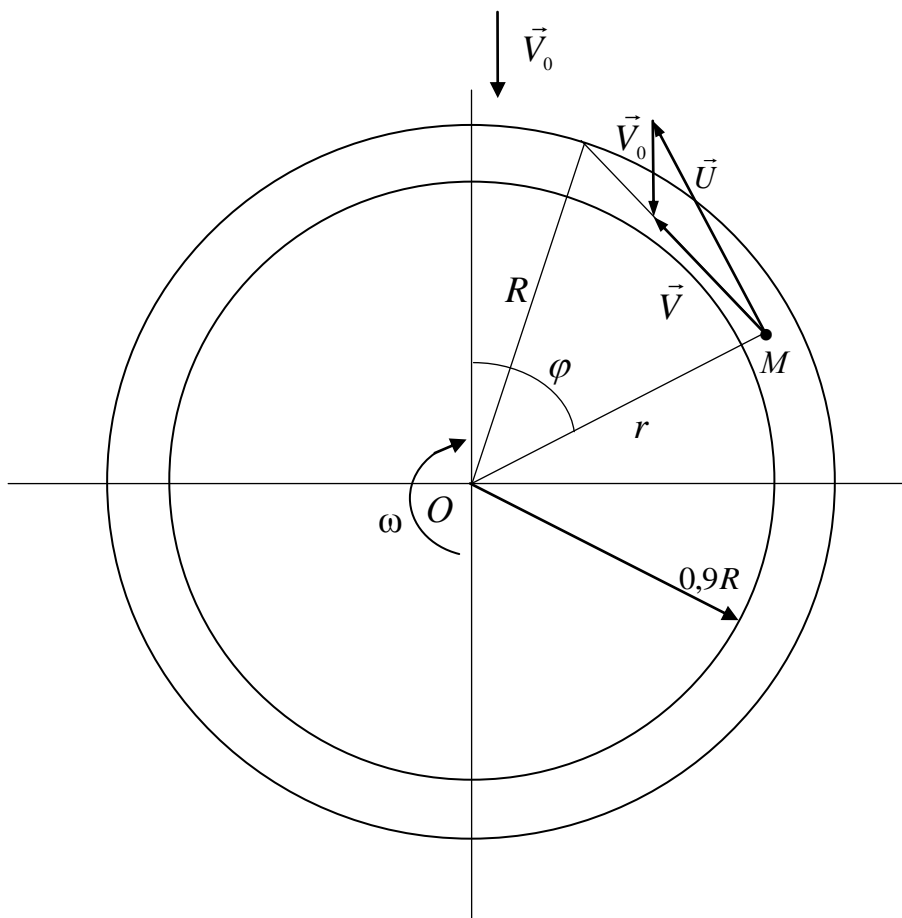


Рисунок 4.15 - Вращающийся кольцевой электрод в потоке жидкости

$$V = \omega r \sqrt{1 + \left(\frac{V_0}{\omega r}\right)^2 - 2 \frac{V_0}{\omega r} \sin \varphi}. \quad (4.116)$$

Также по теореме косинусов найдем расстояние  $l$  от точки  $M$  до внешнего края кольца по направлению вектора  $\vec{V}$ .

$$R^2 = r^2 + l^2 - 2rl \sin \alpha,$$

Принимая во внимание, что  $\sin \alpha = \frac{V_0}{V} \cos \varphi$ ,

$$l = r \frac{V_0}{V} \cos \varphi + \sqrt{\left(r \frac{V_0}{V} \cos \varphi\right)^2 + R^2 - r^2}. \quad (4.117)$$

В соответствии с (4.89) толщина диффузионного слоя в точке  $M$

$$\delta = 0,3 \sqrt{\frac{\nu \left( r \frac{V_0}{V} \cos \varphi + \sqrt{\left(r \frac{V_0}{V} \cos \varphi\right)^2 + R^2 - r^2} \right)}{V}}. \quad (4.118)$$

Сделаем упрощения. При  $V_0 \ll \omega r$  получим  $V \approx \omega r$ . Тогда

$$\delta \approx 0,3 \sqrt{\frac{\nu}{\omega}} \cdot \sqrt{\frac{V_0 \cos \varphi}{\omega R} \cdot \frac{R}{r} + \sqrt{\left(\frac{V_0}{\omega R} \cdot \frac{R}{r} \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{R}{r}\right)^2} - 1}. \quad (4.119)$$

Поток диффузии на элементарную площадку в окрестностях точки  $M$

$$dI = \frac{Dc_0}{\delta} r dr d\varphi = 3,33 Dc_0 \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \frac{r dr d\varphi}{\sqrt{\frac{V_0 \cos \varphi}{\omega R} \cdot \frac{R}{r} + \sqrt{\left(\frac{V_0}{\omega R} \cdot \frac{R}{r} \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{R}{r}\right)^2} - 1}}. \quad (4.120)$$

Поток диффузии на весь электрод

$$I = 3,33 Dc_0 \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{r dr d\varphi}{\sqrt{\frac{V_0 \cos \varphi}{\omega R} \cdot \frac{R}{r} + \sqrt{\left(\frac{V_0}{\omega R} \cdot \frac{R}{r} \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{R}{r}\right)^2} - 1}}. \quad (4.121)$$

После введения новой переменной  $t = r/R$  интеграл принимает вид, более удобный для вычисления.

$$I = 3,33DR^2c_0\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\int_0^{2\pi}\int_{0,9}^1\frac{tdtd\varphi}{\sqrt{\frac{V_0\cos\varphi}{\omega R}\cdot\frac{1}{t}+\sqrt{\left(\frac{V_0}{\omega R}\cdot\frac{1}{t}\cos\varphi\right)^2+\left(\frac{1}{t}\right)^2-1}}}. \quad (4.122)$$

Пусть  $\frac{V_0}{\omega R} = 0,05$ . Тогда

$$I = 3,98DR^2c_0\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}. \quad (4.123)$$

Поток практически не отличается от (4.114), что ожидаемо. Посмотрим, как влияет на поток диффузии пульсация скорости  $V_0$ . Обозначим через  $J(x)$  двойной интеграл в (4.122), где  $x = V_0 / \omega R$ . Расчет по формуле (4.122) при  $\frac{V_0}{\omega R} = 0,05$  дает

значение  $\frac{\Delta J}{\Delta x} = 0,43$  (вычислено при  $\Delta V_0 / \omega R = 0,001$ , т.е. для изменения скорости

$V_0$  на 2%). Это значит, что пульсация потока диффузии за счет пульсации скорости  $\Delta V_0$  равна

$$\Delta I = 3,33Dc_0R^2\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\cdot\left(0,43\frac{\Delta V_0}{\omega R}\right) = 1,43DRc_0\sqrt{\frac{1}{\nu\omega}}\Delta V_0. \quad (4.124)$$

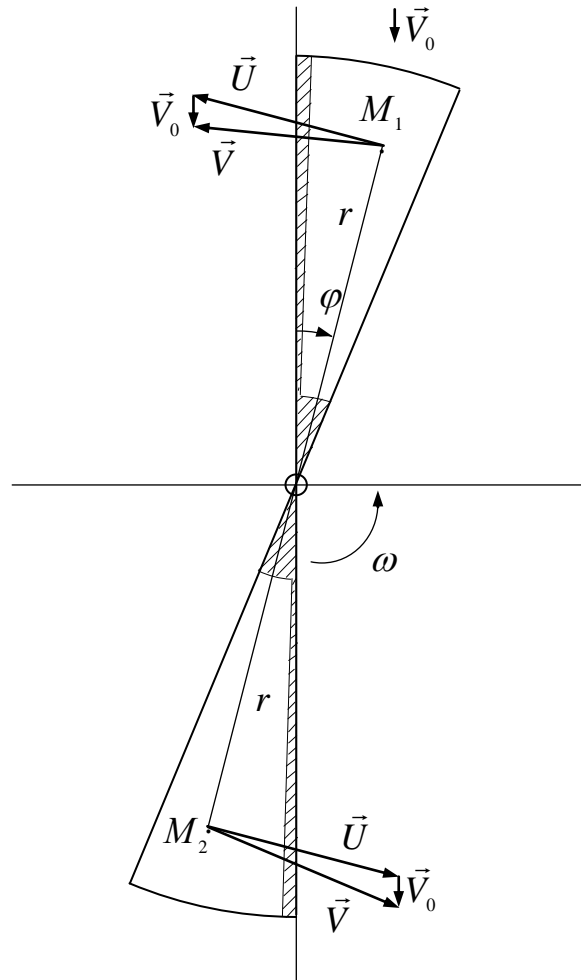
При сравнении (4.124) и (4.111), можно видеть, что пульсация потока диффузии на вращающийся электрод в  $3,56\sqrt{\frac{\omega R}{V_0}} = 15$  раз меньше, чем на неподвижный.

Выше показано, что применение в датчике электродов, выполненных в виде двух идентичных плоских секций, вращающихся в одной плоскости вокруг общего геометрического центра, может повысить его чувствительность более чем на порядок за счет уменьшения специфического электродного шума движения. При таком уменьшении шума движения чувствительность датчика ограничивается уже его тепловым шумом, который определяется сопротивлением датчика, соответственно, площадью двух секций электрода. Однако увеличение размеров электрода сужает полосу частот, в которой осуществляется компенсация пульсаций потенциала на противоположных секциях электрода. В наших расчетах не учитыва-

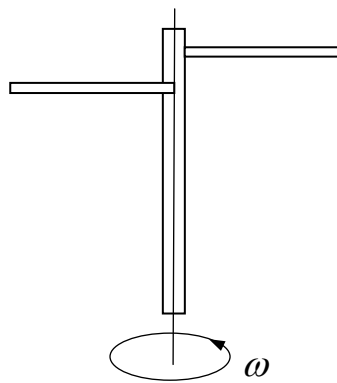
лось, что вторая секция электрода движется в турбулентном следе первой секции. Не учитывалось также, что при высокой скорости вращения турбулентность возникает и на поверхности одной секции электрода. Поэтому следует ожидать, что реальный выигрыш по уменьшению шума движения существенно меньше расчетного. Кроме того, как показано ниже, при вращении двухсекционного электрода в потоке жидкости потенциал электрода приобретает пульсацию с частотой вращения, которая является сильной помехой. Частотная фильтрация такой сильной помехи до приемлемого уровня представляет собой достаточно сложную техническую задачу. Автором предложена конструкция датчика, свободная от многих указанных недостатков.

В этом датчике для увеличения площади электродов и уменьшения теплового шума секции электродов выполнены в виде диаметрально противоположных круговых секторов. Чтобы вторая секция при этом не находилась в турбулентном следе первой, секции расположены в параллельных плоскостях, перпендикулярных оси вращения. Также путем покрытия слоем диэлектрика из работы исключена область электрода, прилегающая к оси вращения, где линейная скорость точек поверхности электрода невелика. Чтобы это мало отражалось на рабочей площади электрода, исключен участок радиусом  $0,3R$  ( $R$  – радиус сектора), что уменьшает площадь не более чем на 10%. Пусть электрод, выполнен в виде двух расположенных в параллельных плоскостях диаметрально противоположных секторов 1 и 2, установленных на общей оси 3, вращающийся с угловой скоростью  $\omega$  (рисунок 4.16). В дальнейших расчетах полагаем, что электрический контакт с водой осуществляется только одной стороной электрода. Области поверхности электрода, покрытые диэлектриком и не имеющие электрического контакта с водой, на рисунке 4.16 обозначены штриховкой. Датчик, следовательно, и электрод, буксируется в неподвижной воде с постоянной скоростью  $\vec{V}_0$ , вектор скорости направлен вдоль поверхности электрода. Скорость относительно жидкости произвольной точки  $M_1$  поверхности электрода верхнего по рисунку 4.16 сектора, находящейся на расстоянии  $r$  от оси вращения, определяется формулой (4.116).

Здесь  $\varphi$  - угловая координата точки  $M_1$ , считая от вертикальной оси на рисунке 4.16. Вектор  $\vec{U}$  - это скорость точки  $M_1$  относительно неподвижной воды при



а)



б)

Рисунок 4.16 - Вращающийся электрод в виде двух диаметрально противоположных секторов



вращении электрода, по модулю она равна  $\omega r$ . Для нижнего сектора в диаметрально противоположной точке  $M_2$

$$V = \omega r \sqrt{1 + \left(\frac{V_0}{\omega r}\right)^2 + 2 \frac{V_0}{\omega r} \sin \varphi} . \quad (4.125)$$

Если  $\omega r \gg V_0$ , то можно считать, что вектор  $\vec{V}$  перпендикулярен к радиусу  $r$ . Расстояние от края сектора до точки  $M_1$  равно длине дуги  $l = r(\varphi - \varphi_0)$ , где  $\varphi_0$  - угловая координата края сектора. Толщина диффузионного слоя на гладкой полу-бесконечной пластинке, которая ламинарно обтекается потоком жидкости, имеющим скорость  $\vec{V}_0$ , определяется формулой [94] (Левич)

$$\delta \approx 3 \left(\frac{D}{\nu}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{\nu l}{V_0}} , \quad (4.126)$$

где  $l$  - расстояние от передней кромки пластинки до точки наблюдения (в нашем случае до точки  $M_1$ ),  $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  - кинематическая вязкость электролита,  $D = 2,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  - коэффициент диффузии атомов кислорода. Для электрода на рис. 4.16 в (4.126) вместо скорости  $\vec{V}_0$  следует использовать скорость  $\vec{V}$ , которая определяется формулами (4.116) и (4.125). Плотность потока диффузии (моль/м<sup>2</sup>с) кислорода к поверхности верхнего сектора электрода с учетом (4.116), (4.126)

$$j(r; \varphi) = \frac{Dc_0}{\delta(r; \varphi)} = \frac{Dc_0}{3} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \cdot \frac{\sqrt[4]{1 + \left(\frac{V_0}{\omega r}\right)^2 - 2 \frac{V_0}{\omega r} \sin \varphi}}{\sqrt{\varphi - \varphi_0}} , \quad (4.127)$$

где  $c_0$  - концентрация кислорода в толще электролита. Типичная концентрация атомов кислорода при температуре 20<sup>0</sup>С для открытой воды  $c_0 = 0,5 \cdot 10^{-3}$  моль/л. Поток диффузии (моль/с) на поверхность электрода, размер которого в направлении вектора скорости набегающего потока жидкости много больше толщины диффузионного слоя  $\delta$ , можно вычислить интегрированием плотности потока  $j$  по всей площади электрода [94]. На передней кромке электрода толщина диффузионного слоя минимальна, поэтому здесь плотность потока диффузии максималь-

на. Как это показано в разделе 4.3, целесообразно кроме области радиусом  $0,3R$ , прилегающей к оси вращения, исключить из работы также секторальную область электрода вблизи передней кромки с углом, равным  $0,1$  от угла всего сектора, чтобы это не слишком уменьшало площадь электрода.

Необходимо иметь в виду, что развитая Левичем [94] теория конвективной диффузии к плоскому электроду в потоке жидкости, на которой основаны наши расчеты, справедлива для ламинарного обтекания электрода. У реального неподвижного плоского электрода, обтекаемого потоком воды со скоростью  $V_0$ , на его передней кромке формируется пограничный слой, который характерен ламинарным движением жидкости. Однако по мере удаления от передней кромки толщина пограничного слоя

$$\delta_0 \approx 3\sqrt{\nu/V_0} \quad (4.128)$$

(это на порядок больше толщины диффузионного слоя  $\delta$ ) растет и на некотором расстоянии  $l_{кр}$  от передней кромки достигает такого значения, при котором число Рейнольдса

$$Re = V_0 \delta_0 / \nu \quad (4.129)$$

достигает критического значения  $Re_{кр} = 1500$ , при котором ламинарное течение переходит в турбулентное [94] (Левич). Для быстро вращающегося электрода роль скорости  $V_0$  в (4.128) и (4.129) выполняет скорость  $U = \omega r$ . Пусть  $\omega R = 15V_0$ . При этом можно считать, что практически на всей поверхности электрода условие  $\omega r \gg V_0$  выполняется. Потребуем, чтобы даже на наибольшем расстоянии  $r = R$  от оси вращения электрода не возникала турбулентность. Из (4.128) и (4.129) получаем, что угловой размер сектора электрода

$$\varphi \leq 25 \cdot 10^4 \nu / \omega R^2. \quad (4.130)$$

Если в (4.130) вместо  $\omega R$  подставить  $15V_0$ , получим при  $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

$$\varphi \leq 1/60V_0R. \quad (4.131)$$

При  $R = 0,02 \text{ м}$  и скорости потока  $V_0 = 2 \text{ м/с}$  получаем  $\omega = 1500 \text{ с}^{-1}$  и максимальный угол сектора  $22,2$  градуса.

Пусть электрод имеет две секции с углом 22,5 градуса, который практически равен максимальному. Вычислим поток диффузии на электрод при восьми угловых положениях: левая кромка верхнего сектора образует угол  $\varphi_0$  с вертикальной осью на рисунке 4.16, равный  $0; \pi/8; \pi/4; 3\pi/8; \pi/2; 5\pi/8; 3\pi/4; \pi$ . В общем случае поток диффузии на верхний сектор

$$I = \frac{Dc_0}{3} \left( \frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \int_{0,3R}^R \int_{\varphi_0+\pi/80}^{\varphi_0+\pi/8} \frac{\sqrt{1 + \left( \frac{V_0}{\omega r} \right)^2 - 2 \frac{V_0}{\omega r} \sin \varphi}}{\sqrt{\varphi - \varphi_0}} r dr d\varphi. \quad (4.132)$$

Сделаем замену переменной:  $r/R = t$ . В первом положении ( $\varphi_0 = 0$ )

$$I_1 = \frac{Dc_0}{3} \left( \frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R^2 \int_{0,3}^1 \int_{\pi/80}^{\pi/8} \frac{\sqrt{1 + \left( \frac{V_0}{\omega R t} \right)^2 - 2 \frac{V_0}{\omega R t} \sin \varphi}}{\sqrt{\varphi}} t dt d\varphi. \quad (4.133)$$

Двойной интеграл в (4.133) обозначим через  $J_1$ .

$$J_1 = \int_{0,3}^1 \int_{\pi/80}^{\pi/8} \frac{\sqrt{1 + \left( \frac{V_0}{\omega R t} \right)^2 - 2 \frac{V_0}{\omega R t} \sin \varphi}}{\sqrt{\varphi}} t dt d\varphi. \quad (4.134)$$

Для нижней секции электрода в соответствии с (4.125) интеграл имеет вид

$$J_2 = \int_{0,3}^1 \int_{\pi/80}^{\pi/8} \frac{\sqrt{1 + \left( \frac{V_0}{\omega R t} \right)^2 + 2 \frac{V_0}{\omega R t} \sin \varphi}}{\sqrt{\varphi}} t dt d\varphi. \quad (4.135)$$

Поток диффузии кислорода на весь двухсекционный электрод (рисунок 4.16)

$$I_{1,2} = \frac{Dc_0}{3} \left( \frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R^2 (J_1 + J_2) = \frac{Dc_0}{3} \left( \frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R^2 J_{1,2}. \quad (4.136)$$

Аналогично находится поток диффузии на электрод при других значениях угла  $\varphi_0$ . Значения интегралов  $J_{1,2}, J_{3,4}, J_{5,6}, J_{7,8}, J_{9,10}, J_{11,12}, J_{13,14}, J_{15,16}$  для восьми угловых положений электрода, состоящего из двух секторов (рисунок 4.16), при  $R = 0,02$  м,  $\omega = 1500 \text{ с}^{-1}$  и  $V_0 = 2$  м/с, приведены в таблице 4.1, а при скорости  $V_0 = 2,02$  м/с, то есть при увеличении скорости буксировки электрода на 1%, при тех же положениях электрода - в таблице 4.2.

Таблица 4.1. Значения двойного интеграла в (4.132) при  $V_0 = 2 \text{ м/с}$ .

$\varphi_0 = 0$	$\varphi_0 = \pi/8$	$\varphi_0 = \pi/4$	$\varphi_0 = 3\pi/8$
$J_{1,2} = 0,78198425$	$J_{3,4} = 0,781112663$	$J_{5,6} = 0,779829179$	$J_{7,8} = 0,778883646$
$\varphi_0 = \pi/2$	$\varphi_0 = 5\pi/8$	$\varphi_0 = 3\pi/4$	$\varphi_0 = \pi$
$J_{9,10} = 0,778853977$	$J_{11,12} = 0,779758757$	$J_{13,14} = 0,781043838$	$J_{15,16} = 0,781956183$

Таблица 4.2. Значения двойного интеграла в (4.132) при  $V_0 = 2,02 \text{ м/с}$ .

$\varphi_0 = 0$	$\varphi_0 = \pi/8$	$\varphi_0 = \pi/4$	$\varphi_0 = 3\pi/8$
$J'_{1,2} = 0,782026855$	$J'_{3,4} = 0,781138128$	$J'_{5,6} = 0,779828948$	$J'_{7,8} = 0,778864116$
$\varphi_0 = \pi/2$	$\varphi_0 = 5\pi/8$	$\varphi_0 = 3\pi/4$	$\varphi_0 = \pi$
$J'_{9,10} = 0,778833834$	$J'_{11,12} = 0,779757098$	$J'_{13,14} = 0,78106794$	$J'_{15,16} = 0,781998241$

Сравнение значений, приведенных в таблицах 4.1 и 4.2, показывает, что при постоянной скорости  $V_0$  относительная пульсация потока диффузии за счет вращения электрода (она равна относительной пульсации интеграла в табл. 4.1) составляет 0,002, в то время как относительная пульсация потока диффузии за счет пульсации скорости  $V_0$ , равной 1%, составляет 0,000015. Следовательно, помеха от вращения электрода примерно в 133 раза превышает пульсацию потенциала электрода, связанную с пульсациями скорости набегающего на электрод потока жидкости, о чем и говорилось выше. Для устранения этой помехи следует электрод выполнить многосекционным. Например, при угловом размере сектора 22,5 градусов электрод должен иметь 16 секторов, расположенных в параллельных плоскостях и повернутых относительно друг друга так, чтобы в плане они составляли полный круг (рисунок 4.17). Число секторов можно удвоить, то есть расположить в разных плоскостях не восемь, а шестнадцать пар электродов.

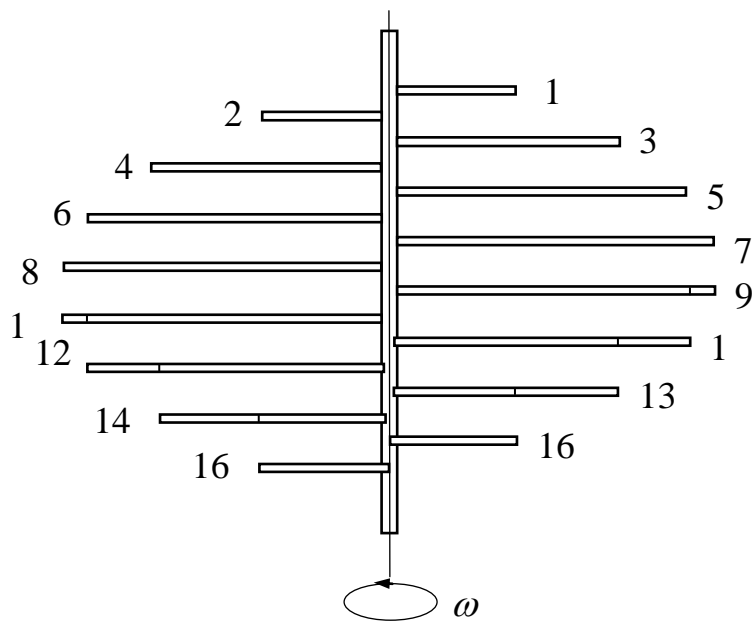
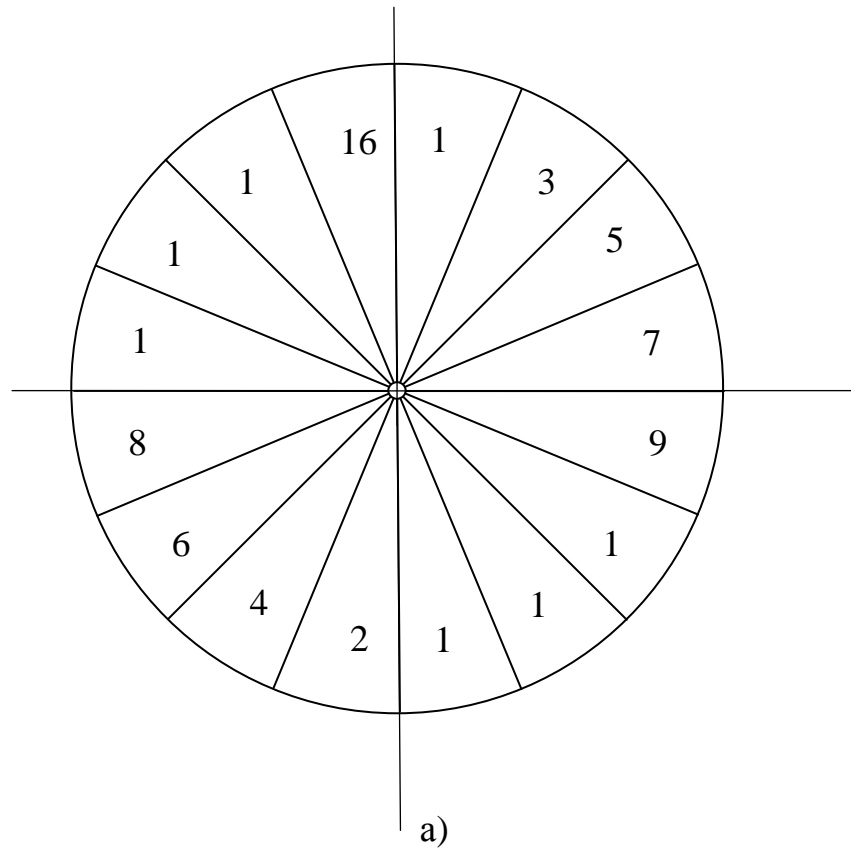


Рисунок 4.17 - Вращающийся электрод, имеющий восемь пар секторов

Это увеличивает площадь электрода и уменьшает сопротивление датчика, следовательно, приводит к уменьшению его теплового шума и к увеличению чувствительности. Определим восприимчивость электрода с 16 секторами к пульсациям скорости жидкости и выигрыш в чувствительности датчика за счет подавления шума движения по сравнению с неподвижным электродом в виде круглой пластины того же радиуса. В соответствии с таблицей 4.1 при коэффициенте диффузии  $D = 2,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 / \text{с}$ , кинематической вязкости жидкости  $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$  и скорости  $V_0 = 2 \text{ м/с}$  поток диффузии на вращающийся электрод

$$\begin{aligned} I_{1\text{вр}} &= \frac{Dc_0}{3} \left( \frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R^2 (J_{1,2} + J_{3,4} + J_{5,6} + J_{7,8} + J_{9,10} + J_{11,12} + J_{13,14} + J_{15,16}) = \\ &= 2,081140831 Dc_0 \left( \frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R^2 \end{aligned} \quad (4.137)$$

При скорости  $V_0 = 2,02 \text{ м/с}$  в соответствии с таблицей 4.2 аналогично

$$\begin{aligned} I_{2\text{вр}} &= \frac{Dc_0}{3} \left( \frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R^2 (J'_{1,2} + J'_{3,4} + J'_{5,6} + J'_{7,8} + J'_{9,10} + J'_{11,12} + J'_{13,14} + J'_{15,16}) = \\ &= 2,08117172 \frac{Dc_0}{3} \left( \frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R^2 \end{aligned} \quad (4.138)$$

Изменение суммы интегралов  $\Delta J$  при изменении скорости буксировки  $\Delta V_0 = 0,02 \text{ м/с}$

$$\begin{aligned} \Delta J &= (J'_{1,2} + J'_{3,4} + J'_{5,6} + J'_{7,8} + J'_{9,10} + J'_{11,12} + J'_{13,14} + J'_{15,16}) - \\ &- (J_{1,2} + J_{3,4} + J_{5,6} + J_{7,8} + J_{9,10} + J_{11,12} + J_{13,14} + J_{15,16}) \approx 0,000093 \end{aligned} \quad (4.139)$$

Изменение потока диффузии кислорода на вращающийся электрод за счет изменения скорости набегающего при буксировке на электрод потока жидкости на  $\Delta V_0 = 0,02 \text{ м/с}$  составляет

$$\Delta I_{\text{вр}} = \Delta J \frac{Dc_0}{3} \left( \frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R^2 \approx 0,000031 Dc_0 \left( \frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R^2 . \quad (4.140)$$

Изменение потока диффузии на круглый неподвижный электрод при скачке скорости буксировки  $\Delta V_0$  определяется формулой (4.99), которую удобнее записать в виде

$$\Delta I_n = 7,57 D c_0 R^2 \frac{\Delta V_0}{\sqrt{\nu W_0 R}}. \quad (4.141)$$

Сравним (4.140) и (4.141).

$$\frac{\Delta I_n}{\Delta I_{вр}} = \frac{22,71}{\Delta J} \frac{\Delta V_0}{\sqrt{V_0 \omega R}} \left( \frac{D}{\nu} \right)^{1/3} = 2,442 \cdot 10^5 \frac{\Delta V_0}{\sqrt{V_0 \omega R}} \left( \frac{D}{\nu} \right)^{1/3}. \quad (4.142)$$

При  $\Delta V_0 = 0,02$  м/с получаем  $\Delta I_n / \Delta I_{вр} \approx 123$ . То есть пульсация потока диффузии на неподвижный дисковый электрод в 123 раза больше, чем на вращающийся электрод того же радиуса и той же площади. Примерно во столько же раз уменьшается и шум движения, связанный с пульсацией скорости буксировки датчика. Тепловой шум датчика при этом лишь на 10% больше, чем у датчика с неподвижными дисковыми электродами того же радиуса. На практике такого уменьшения шума движения не требуется, поскольку чувствительность датчика ограничивается другими компонентами шума. Во-первых, тепловым шумом активного сопротивления датчика. Во-вторых, уменьшение пульсаций потенциала вращающегося электрода возможно, только если эти пульсации вызваны одной причиной. У нас это пульсации скорости буксировки и пульсации, связанные с пересечением датчиком крупномасштабных турбулентных вихрей. Некоррелированные пульсации не вычитаются, а складываются квадратично. Если электрический контакт с водой осуществляется не с одной, как рассмотрено в статье, а двумя сторонами плоского электрода, то это также уменьшает активное сопротивление датчика и величину теплового шума. При этом степень подавления пульсаций электродного потенциала, вызванных пульсациями скорости воды, не изменяется по сравнению с расчетной. Как показано в разделе 3.2, увеличение избыточного электрохимического шума у длительно выдержанных в морской воде электродов при движении жидкости в отсутствие турбулентности проявляется лишь на частотах ниже 40Гц.

Датчик с вращающимися электродами схематично изображен на рисунке 4.18. Предпочтительное направление буксировки – перпендикулярное плоскости расположения осей электродов, то есть плоскости чертежа. Датчик содержит электроды 1 и 2, установленные на металлических осях 3 и 4. Оси через сальники

5 и 6 вставлены в герметические корпуса 7 и 8, установленные на буксируемой за кораблем диэлектрической платформе 9. Электромоторы 10 и 11 установлены внутри герметических корпусов 7,8. Для экранирования помех от электромоторов корпуса 7 и 8 выполнены из мягкой стали. При этом чтобы в меньшей степени

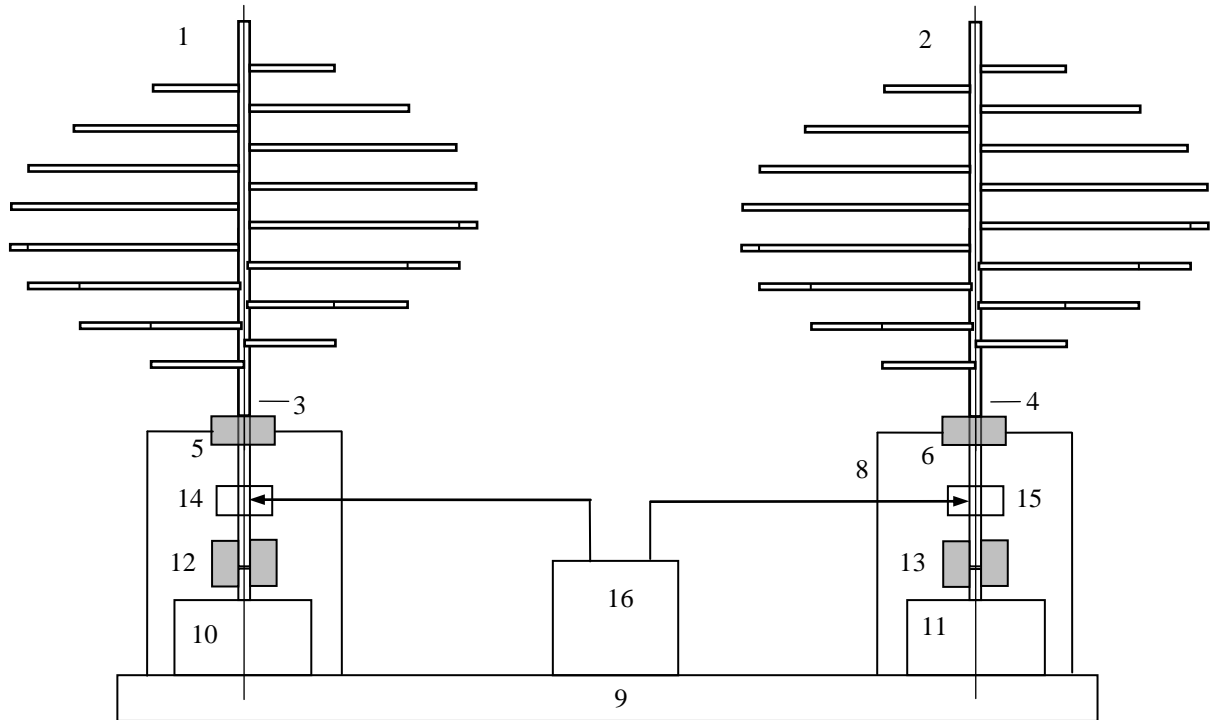


Рисунок 4.18 - Электродный датчик с вращающимися электродами

искажать принимаемое электрическое поле они должны иметь снаружи диэлектрическое покрытие. Вал каждого электродвигателя через диэлектрические муфты 12 и 13 соединен с осью 3 и 4 соответствующего электрода. Напряжение с датчика снимается с помощью пружинных токосъемников 14 и 15, которые установлены на осях 3 и 4 и с помощью изолированных соединительных проводов подключены к приемно-измерительному блоку 16, осуществляющему усиление, частотную фильтрацию и измерение выходного напряжения датчика. Для лучшего подавления помехи, которая может возникать от электродвигателей и эксцентриситета электродов, частота вращения должна быть выше максимальной частоты рабочего диапазона измеряемого переменного электрического поля.



Как следует из условия  $\omega R = 15V_0$  для реализации большого выигрыша в шуме движения требуется высокая скорость вращения электродов. При уменьшении скорости вращения этот выигрыш в шуме и чувствительности перед неподвижными электродами уменьшается. Однако увеличение чувствительности датчика даже в несколько раз имеет большое значение, поскольку мощность сверхнизкочастотного передатчика достигает единиц мегаватт. Здесь показана принципиальная возможность уменьшения шума движения при вращении электродов.

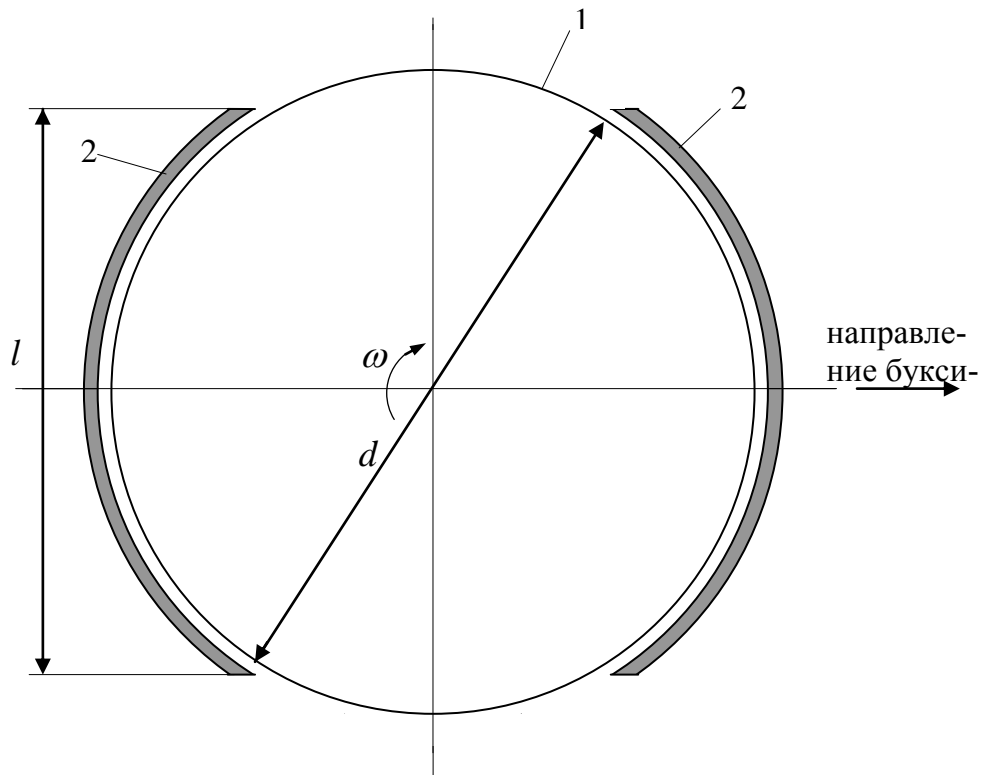


Рисунок 4.19 - Цилиндрический вращающийся электрод в обтекателе

Возможна также конструкция датчика, который использует цилиндрические вращающиеся электроды. На рисунке 4.19 показан электрод, выполненный в виде гладкого металлического цилиндра 1 с диаметром  $d$ , вращающегося вокруг своей оси с угловой скоростью  $\omega$ . Диэлектрический обтекатель 2, выполненный также в виде цилиндра, соосного с цилиндром 1, защищает переднюю и заднюю часть электрода от набегающего потока воды и его завихрений. Обтекатель имеет идентичные прямоугольные окна, плоскости которых параллельны и отстоят на рав-

ные расстояния от оси цилиндра 1. Вектор скорости набегающего на электрод потока жидкости параллелен этим плоскостям. Диаметр  $d$  цилиндра 1 больше, чем поперечный размер обтекателя  $l$ . Внутренний диаметр обтекателя близок к диаметру цилиндра 1, поэтому можно считать, что электрический контакт электрода с окружающей средой осуществляется только через окна обтекателя. Если эти открытые окна являются идентичными и достаточно узкими в направлении буксировки, то их можно считать одинаковыми плоскими площадками, одна из которых движется по направлению буксировки, а другая навстречу со скоростью  $U = \omega d / 2$ . Электродный датчик с цилиндрическими вращающимися электродами схематично показан на рисунке 4.20. Стрелкой показано направление буксировки. Датчик имеет первый и второй электроды. Первый электрод выполнен в виде гладкого металлического цилиндра 1, расположенного в диэлектрическом обтекателе 2. Второй электрод выполнен в виде гладкого металлического цилиндра 3, расположенного в диэлектрическом обтекателе 4. Цилиндры 1 и 3 установлены с возможностью вращения на металлических осях 5 и 6 в диэлектрических подшипниках 7,8,9,10. Первый и второй электрод установлены на диэлектрической платформе 11 таким образом, чтобы условия обтекания электродов с обеих сторон были одинаковы. Для этого ширина платформы не превышает расстояния между ближними торцами цилиндров 1 и 3. В общем случае оси 5 и 6 параллельны и расположены в плоскости, параллельной плоскости платформы 11. В частном случае, изображенном на рисунке 4.20, оси 5 и 6 находятся на одной прямой. Через сальники 12 и 13 оси вставлены в герметический корпус 14, также установленный на буксируемой за кораблем диэлектрической платформе 11. Внутри герметического корпуса 14 установлен электромотор 15, вал которого имеет вылет в обе стороны. Для экранирования помех от электромотора корпус 14 выполнен из мягкой стали. При этом чтобы не исказить принимаемое электрическое поле он имеет снаружи диэлектрическое покрытие. Например, он окрашен стойкой краской или покрыт пластиком. Вал электромотора 15 через диэлектрические муфты 16 и 17 соединен с осями 5 и 6 электродов. С помощью пружинных токосъемников 18 и 19 электроды изолированными проводами подключены к приемно-изме-

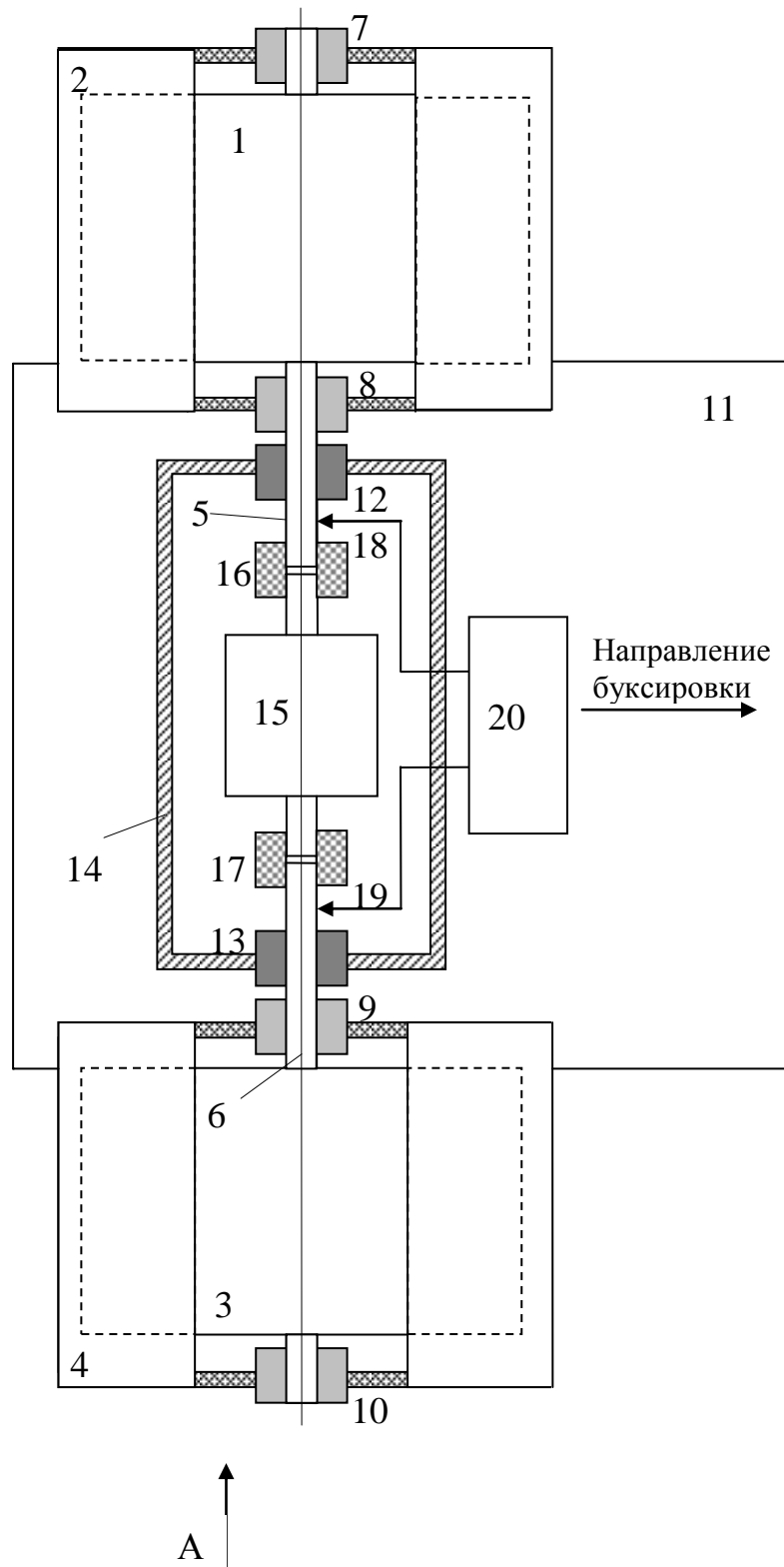


Рис. 4.20. Датчик с цилиндрическими вращающимися электродами.

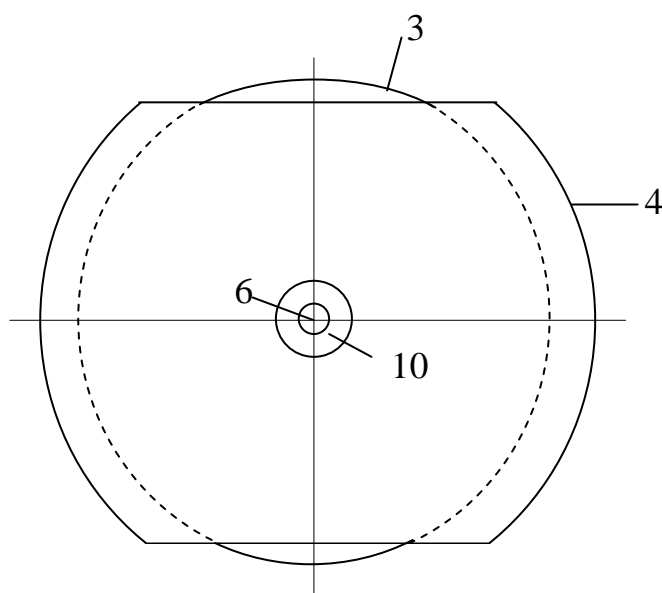
Вид А

Рисунок 4.21 - Вид сбоку на цилиндрический электрод в обтекателе

рительному блоку 20, осуществляющему усиление, частотную фильтрацию и измерение выходного напряжения датчика. Для лучшего подавления помехи, которая может возникать от электродвигателей и эксцентриситета электродов, частота вращения должна быть выше максимальной частоты рабочего диапазона измеряемого поля. На рисунке 4.20 применен местный разрез обтекателей и герметичного корпуса, чтобы лучше были видны оси цилиндров в подшипниках и сальниках. На рисунке 4.21 показан вид сбоку на цилиндрический электрод 3 в обтекателе 4.

Устройство работает следующим образом. Измеряемое электрическое поле создает в морской воде между электродами датчика разность потенциалов. Первый и второй электроды через металлические оси 5,6 и токосъемники 18,19 передают ее на приемно-измерительный блок 20. Скорость буксировки датчика имеет низкочастотные флуктуации, поэтому поток жидкости, обтекающей электроды, имеет пульсации скорости относительно электрода. Пульсации скорости потока жидкости, набегающей на электроды, могут быть вызваны и пересечением датчиком турбулентных вихрей, например, кильватерного следа. Они вызывают флуктуации разности потенциалов между электродами, называемые шумом движения. Металлические цилиндры 1 и 3 приводятся во вращение электромотором 15, бла-

годаря чему величина шума движения уменьшается, как это показано выше. При этом выходное напряжение датчика, обусловленное измеряемым электрическим полем, не зависит от вращения электродов. В результате чувствительность датчика возрастает более чем на порядок. Следует иметь в виду, что цилиндры 1,3, и оси 5,6 необходимо изготавливать из металлов, имеющих низкий уровень электрохимического шума, например, их титана, тантала, нержавеющей стали. Диэлектрическая платформа 11 предназначена не только для крепления узлов датчика, но и стабилизирует положение электродов в пространстве, так как вектор скорости буксировки лежит в ее плоскости. Достоинством такого датчика является то, что при буксировке вторая контактная площадка не может оказаться в турбулентном следе первой. Поэтому корреляция пульсаций скорости потока здесь выше. Как показал Прандтль, при обтекании цилиндра потоком жидкости вращение цилиндра является эффективным способом борьбы с отрывом пограничного слоя и переходом ламинарного обтекания к турбулентному. При этом вблизи поверхности образуется течение с циркуляцией и большой поперечной силой, которое можно рассматривать как течение без трения [95,96].

Размер электрода вносит ограничение в величину выигрыша по чувствительности. При большом диаметре электрода становится заметна неоднородность набегающего потока жидкости по скорости, т.е. скачок скорости  $\Delta V_0$  на противоположных контактных площадках электрода неодинаков, поэтому невозможно полное вычитание пульсаций потока диффузии, что требует уменьшения диаметра электрода. Однако уменьшение диаметра электрода ведет к увеличению активного сопротивления датчика и связанного с ним уровня теплового шума, что приводит к уменьшению его чувствительности, а также к уменьшению скорости движения поверхности электрода относительно жидкости, а это увеличивает чувствительность электрода к пульсациям скорости и увеличивает шум движения. Выбор диаметра электрода из компромиссных соображений не всегда позволяет повысить чувствительность устройства до требуемого значения. Однако, как и в случае датчика с секторными электродами, число пар цилиндрических электродов тоже

можно увеличить, при этом уменьшив их диаметр и превратив каждую пару в самостоятельный датчик [92]. В таком случае напряжение полезного сигнала от каждой пары электродов синфазно и складывается в приемно-усилительном блоке по амплитуде, а тепловой шум и пульсации разности потенциалов электродов, которые остались не скомпенсированы в силу не полной корреляции пульсаций скорости, суммируются по мощности, что дополнительно увеличивает отношение сигнал/шум по сравнению с датчиком, имеющим одну пару электродов.

Таким образом, применение вращающихся электродов в датчике электрического поля в электролите дает возможность уменьшить электродный шум движения более чем на порядок и существенно повысить чувствительность датчика. Физически уменьшение шума движения объясняется тем, что, во-первых, толщина диффузионного слоя нелинейно зависит от скорости жидкости. Поэтому вращение электрода снижает чувствительность электрода к пульсациям скорости. Во-вторых, пульсации потока диффузии в диаметрально противоположных точках электрода противофазны, поэтому частично вычитаются. Как отмечалось выше, размер электрода вносит ограничение в величину выигрыша по чувствительности. При большой величине радиуса  $R$  становится заметна неоднородность набегающего потока жидкости по скорости в пределах одного электрода. Скачок скорости  $\Delta V_0$  в диаметрально противоположных точках кольца становится неодинаковым, поэтому невозможно полное вычитание пульсаций потока диффузии. Кроме того, если на неподвижный датчик набегающий поток морской воды со скоростью  $V_0$  порядка единиц метров в секунду, то при радиусе электрода порядка десятых долей метра временная задержка в воздействии пульсации скорости на диаметрально противоположные участки кольца достигает величины порядка десятых долей секунды. Это приводит к тому, что эффективно подавляются только низкочастотные составляющие шума движения. Уменьшая размер электрода, можно расширить диапазон частот, в котором шум движения в значительной степени подавлен, до нескольких десятков герц. При этом чтобы не увеличивать тепловой шум датчика, можно вместо одного вращающегося электрода приме-

нить несколько электродов, электрически соединенных между собой. Если же датчик буксируется за кораблем, то пульсации скорости, связанные с буксировкой, действуют на всей площади электрода одновременно и ограничения на полосу частот, в которой шум движения эффективно подавляется, отсутствуют. Для исключения влияния помехи, связанной с недостаточной балансировкой электрода, частота вращения электрода должна превышать верхнюю границу частотного диапазона принимаемого сигнала.

#### ***4.5. Влияние обтекателей на шум движения электродного датчика***

Как показано выше, пульсации скорости жидкости являются причиной шума движения электродного датчика. Для уменьшения пульсаций применяют диэлектрические обтекатели, исключая непосредственное воздействие потока жидкости на электроды датчика. На установке, показанной на рисунке 3.20, выполнен эксперимент по изучению влияния обтекателей на пульсацию потенциала электрода относительно электролита. В эксперименте использованы два обтекателя. Обтекатель №1 (рисунок 4.22 а) имел электроконтактные отверстия на боковой поверхности и три отверстия диаметром 2,5 мм для выпуска воздуха в торцевой

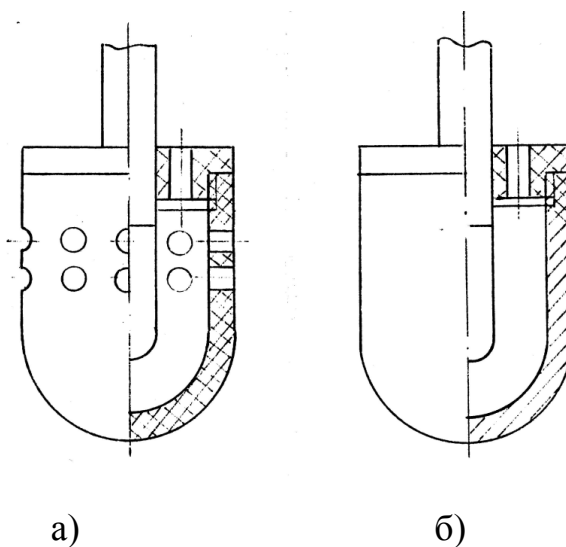


Рисунок 4.22 - Конструкция обтекателей, использовавшихся в эксперименте

части. Обтекатель №2 (рисунок 4.22 б) имел лишь три отверстия в торцевой части, которые одновременно являлись и электроконтактными. Оба обтекателя вы-

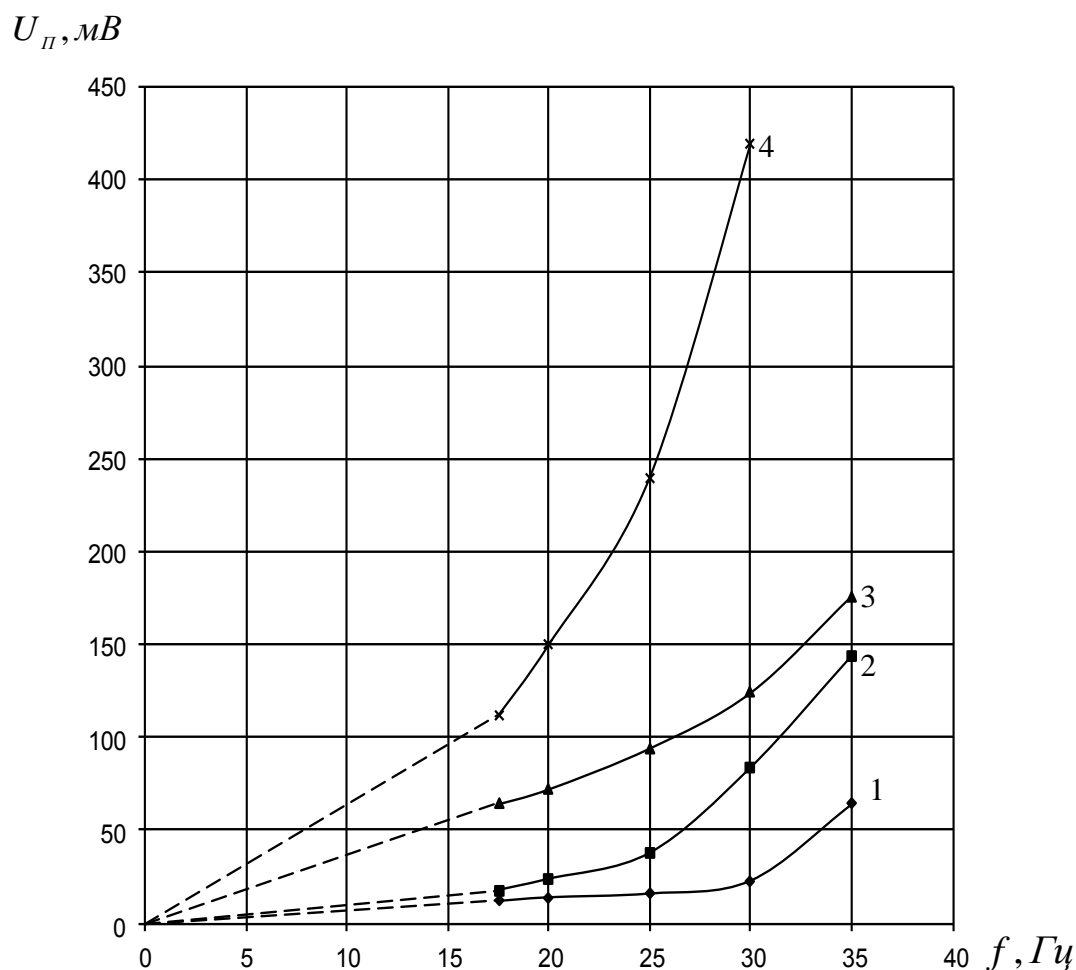


Рисунок 4.23 - Частотные зависимости напряжения пульсации  $U_{п}$  при использовании разных обтекателей. 1 – обтекатель №1, начало измерений; 2 – обтекатель №1, конец измерений; 3 – без обтекателя; 4 – обтекатель №2

полнены из эбонита, имеющего низкое значение электрокинетического потенциала. Измерялось напряжение  $U_{п}$  между неподвижным электродом и электродом, совершающим в электролите гармонические колебания с частотой  $f$ . Назовем его напряжением поляризации независимо от причин возникновения. Измерение зависимости  $U_{п}(f)$  производилось при концентрации электролита 10 г/л после выдержки в нем электрода в течение 5 суток. Результаты измерений при амплитуде колебаний  $A = 0,5$  мм представлены на рисунке 4.23. Пунктиром показана экс-



траполяция графиков в сторону более низких частот, соответствующая развитой в разделах 4.1 и 4.2 теории. Кривая 3 получена для электрода без обтекателя. Кривые 1, 2 - при использовании обтекателя №1, причем кривая 1 соответствует началу, а кривая 2 - концу измерений. Кривая 4 получена для обтекателя №2. Анализ результатов измерений показывает, что во всем исследованном диапазоне частот величина  $U_{\Pi}$  при использовании обтекателя №1 меньше, чем у электрода без обтекателя. Относительное уменьшение напряжения пульсации достигает 4...5 раз на  $f = 17,5$  Гц и падает с ростом частоты, особенно на частотах выше 30 Гц. Причем после вибрации величина пульсационного напряжения  $U_{\Pi}$  повысилась (кривая 2). При использовании обтекателя №2 значение напряжения пульсации  $U_{\Pi}$  в несколько раз выше, чем у электрода без обтекателя: от 1,5 раз на  $f = 17,5$  Гц до 5 раз на  $f = 35$  Гц. По-видимому, увеличение чувствительности к вибрации с течением времени (кривые 1 и 2 на рисунке 4.23) связано с изменениями на поверхности электродов. У электродов без обтекателей, как правило, с течением времени флуктуации электродного потенциала уменьшаются. Можно предположить, что причина роста напряжения  $U_{\Pi}$  обусловлена выделением серы из материала обтекателя и связанными с этим химическими процессами на поверхности электрода. Возможно также выделение пузырьков растворенного газа на поверхности электрода и внутренней поверхности обтекателя. Поскольку электрод защищен от воздействия потока, то при движении электрода они не удаляются и влияют на чувствительность электрода к вибрации. Можно также заметить, что если у электрода без обтекателя наблюдается, как правило, лишь незначительное отклонение зависимости  $U_{\Pi}(f)$  от линейной (рисунок 4.23), то при использовании обтекателей нелинейность зависимостей ярко выражена. Диаметр обтекателя не позволяет считать его много меньшим диаметра сосуда с электролитом, в котором происходят колебания электрода. Это приводит к возникновению механических колебаний во всем объеме жидкости. Возле поверхности второго электрода датчика, неподвижного, жидкость тоже совершает колебания, которые искажают результаты измерения. По данным [16] (Богородский) поверхностный ток обтекателя, возни-

кающий при движении жидкостной обкладки двойного слоя, замыкаясь в окружающей среде, создает трибополяризационный потенциал, величина которого зависит от электрокинетического потенциала материала обтекателя и места расположения электроконтактных отверстий. Наиболее неблагоприятным является расположение электроконтактных отверстий в носовой и кормовой части обтекателя. Таким образом, большую величину поляризационного напряжения при установке обтекателя №2 можно объяснить тем, что все электроконтактные отверстия расположены в его торцевой части. Именно в этом случае можно ожидать наибольших значений трибополяризационной составляющей напряжения  $U_{\Pi}$ . У обтекателя №1 большая часть электроконтактных отверстий расположена на боковой поверхности, где пульсация давления и трибопотенциала значительно меньше. Кроме того, обтекатель №1 имеет проточный объем, что способствует удалению мелких пузырьков газа, которые могут выделяться из воды. Все эти причины могут исказить форму кривых на рисунке 4.23, однако неоспоримым является тот факт, что применение обтекателя №1 позволило уменьшить пульсационное напряжение  $U_{\Pi}$  в несколько раз по сравнению с незащищенным электродом.

Известен также механизм поляризации электрода за счет модуляции толщины двойного слоя [52] (Григин). Напряжение поляризации в этом случае пропорционально  $f^{3/2}$ . Однако в диапазоне частот колебаний скорости потока не выше десятков герц его величина оказывается много меньше теплового шума.

Итак, экспериментально полученные зависимости пульсационного напряжения электрода без обтекателя от частоты и амплитуды вибрации близки к линейным и при интерполяции проходят через начало координат. При этом по фазе напряжение  $U_{\Pi}$  на электродах совпадает с напряжением датчика скорости, следовательно, оно пропорционально скорости движения. Значения напряжения пульсации, приведенное ко входу предварительного усилителя 10, в экспериментах составляли от 40 нВ до 330 нВ. При этом уровень шума в полосе одного измерительного канала спектроанализатора при отсутствии колебаний штока, приведенный ко входу усилителя 10, находился в пределах 6...8 нВ в диапазоне 17,5...35

Гц. Таким образом, пульсационное напряжение существенно превышает уровень шума электродной ячейки в состоянии покоя вместе с собственным шумом измерительного тракта. Это означает, что при измерении электрического поля в электролите (например, в море) с помощью электродных датчиков, установленных на движущихся объектах, поляризация электродов вследствие пульсаций скорости движения жидкости относительно электродов датчика может являться главной причиной, ограничивающей чувствительность измерителя. Для уменьшения поляризации электрода в потоке электролита следует использовать правильно сконструированные обтекатели, у которых электроконтактные отверстия не должны быть расположены в области турбулентных вихрей и вблизи концов обтекателя, иначе применение обтекателя вместо уменьшения приводит к увеличению поляризации электрода. Для уменьшения трибополяризационного потенциала обтекатели должны изготавливаться из материала с низким значением электрокинетического потенциала (полипропилен, поликарбонат [16,17] (Богородский)).

С целью выяснения целесообразности применения обтекателей в практических задачах поставлен натурный эксперимент в морских условиях. Датчик электромагнитного поля представлял собой два титановых электрода с площадью  $S = 50 \text{ см}^2$  в виде цилиндров диаметром 40 мм с полусферическим закруглением на переднем конце. Электроды были установлены на буксируемой заглубляемой платформе на базе 1 метр, перпендикулярной к направлению движения. Конструкция одного электрода в обтекателе показана на рисунке 4.24. В эксперименте использовались обтекатели из эбонита двух видов: №1 - с 200 электроконтактными отверстиями диаметром 5 мм при толщине стенки обтекателя 8 мм и №2 - с 20 электроконтактными отверстиями, расположенными в одном поперечном сечении обтекателя. В арматуре крепления электродов были установлены пьезоэлектрические вибродатчики - акселерометры, регистрирующие механические колебания, направленные вдоль оси электродов. Электроды датчика через повышающий трансформатор были подключены ко входу предварительного усилителя, расположенного в герметичном контейнере, установленном также на платформе. Коэффициент усиления предварительного усилителя с трансформатором равен

5000. С помощью капронового троса платформа буксировалась на глубине 40...45 м со скоростью 2,3...3,5 м/с. Точность измерения глубины и скорости буксировки составляла около 10%. В процессе буксировки производилась запись усиленного шума датчика и выходного напряжения вибродатчиков в диапазоне

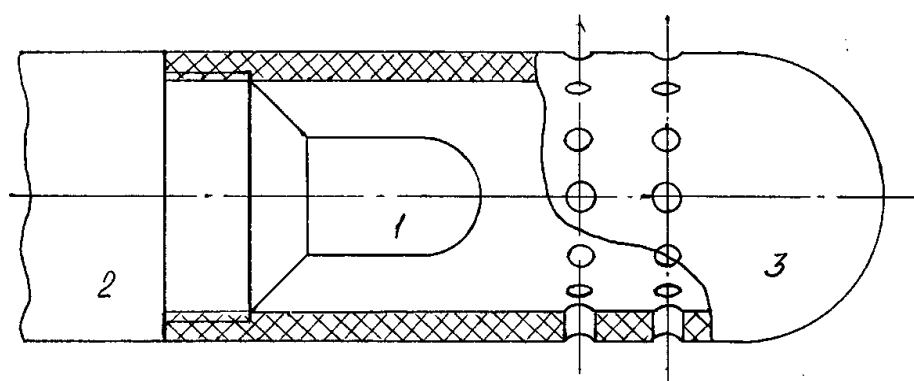


Рисунок 4.24 - Конструкция электрода в обтекателе. 1 – электрод, 2 – арматура крепления электрода, 3 – обтекатель

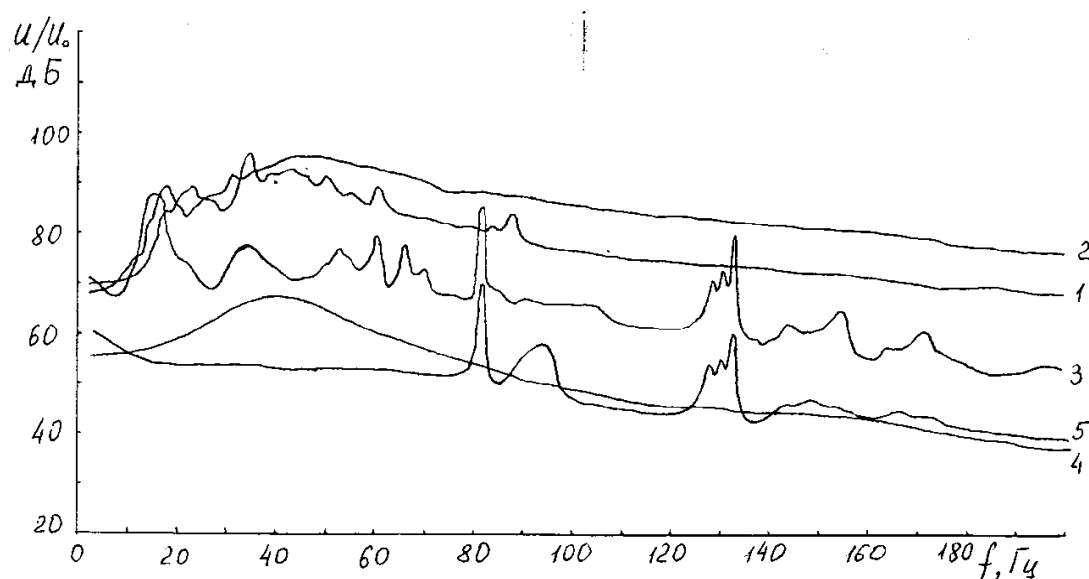


Рисунок 4.25 - Спектры выходного напряжения датчика и собственного шума предварительного усилителя. 1 – шум датчика без обтекателей при  $V=3$  м/с, 2 – шум датчика с обтекателями №1 при  $V=3,5$  м/с, 3 – шум датчика с обтекателями №2 при  $V=3$  м/с, 4 – шум неподвижного датчика, лежащего на грунте, 5 – спектр шума предусилителя с замкнутой первичной обмоткой трансформатора при скорости 2,3 м/с

частот до 200 Гц на измерительный магнитофон. Сделанные записи обрабатывались с помощью спектрального анализатора. В процессе эксперимента выяснилось, что резонансные явления в контуре, образованном емкостью датчика и индуктивностью первичной обмотки входного трансформатора (частота резонанса около 40 Гц), не позволяют выполнить точные измерения абсолютных значений шума. Однако можно произвести сравнение измеренных спектров, которые приведены на рисунке 4.25. Все спектры приведены в относительном масштабе  $U/U_0$ , где  $U_0 = 10^{-6} \text{ В}$ , то есть 120 дБ по оси ординат соответствует напряжению 1 В на входе одного частотного канала спектрального анализатора с полосой 0,5 Гц, который обеспечивал точность измерения спектров не хуже 1 дБ. Сравнение спектров показывает, что при установке обтекателей №1 (рисунок 4.25, кривая 2) спектр шума датчика стал несколько более гладким, чем при отсутствии обтекателей (рисунок 4.25, кривая 1). На частотах до 40 Гц он практически совпадает со спектром шума датчика без обтекателей, а на частотах выше 40 Гц установка обтекателей №1 при незначительном росте скорости буксировки привела к росту шума на величину до 10 дБ. Такое увеличение шума может быть связано с образованием мелких турбулентных вихрей на краях многочисленных электроконтактных отверстий, которые, доходя до поверхности электродов, увеличивали шум датчика в верхней части частотного диапазона. Установка обтекателей №2 (рисунок 4.25, кривая 3) давала снижение шума датчика на частотах выше 20 Гц в среднем на 15...20 дБ по сравнению с датчиком без обтекателей. Отсутствие выигрыша на частотах ниже 20 Гц связано с значительным падением коэффициента передачи входной цепи, что соответствует выводам раздела 2.4. При этом спектр стал сильно изрезанным с выраженными пиками на частотах 16, 82 и 132 Гц, на 4...6 дБ превышающими уровень шума без обтекателей, но не превышающими уровень шума датчика с обтекателями №1. Причиной возникновения этих пиков является механическая вибрация датчика в осевом направлении, поскольку в спектре выходного напряжения вибродатчика (рисунок 4.26), снятого одновременно со спектром датчика с обтекателями №2 (кривая 3 на рисунке 4.25), также присутствуют пики на тех же ча-

стотах. Возможно, что это передаваемая через трос вибрация корпуса буксирующего катера (например, пик на частоте 16 Гц может быть вызван вибрацией от вращения гребного винта), а также собственные вибрации натянутого троса. Поскольку влияние вибрации проявилось только при установке обтекателей №2, можно предположить наличие внутри обтекателей остатков невытесненного воздуха, который обусловил подвижность воды, заполняющей внутренний объем обтекателей, и, как следствие, увеличение шумового напряжения на частотах вибрации. Действительно, полное вытеснение воздуха водой из внутреннего объема обтекателя при малом количестве электроконтактных отверстий представляет определенную проблему. В пользу этого предположения говорит и тот факт, что не было обнаружено явной корреляции между напряжением с выхода вибродатчика и электродным напряжением, поскольку движение воды относительно электрода внутри обтекателя в связи с инерцией происходит по другому закону, чем движение обтекателя при действии вибрации.

Использование входного трансформатора имело такое отрицательное последствие, как микрофонный эффект. Спектр собственного шума предварительного усилителя при коротком замыкании первичной обмотки входного трансформатора и скорости буксировки 2,3 м/с изображен на рисунке 4.25 (кривая 5). Он тоже имел характерные пики на частотах 82 и 132 Гц, однако, в среднем на 20 дБ

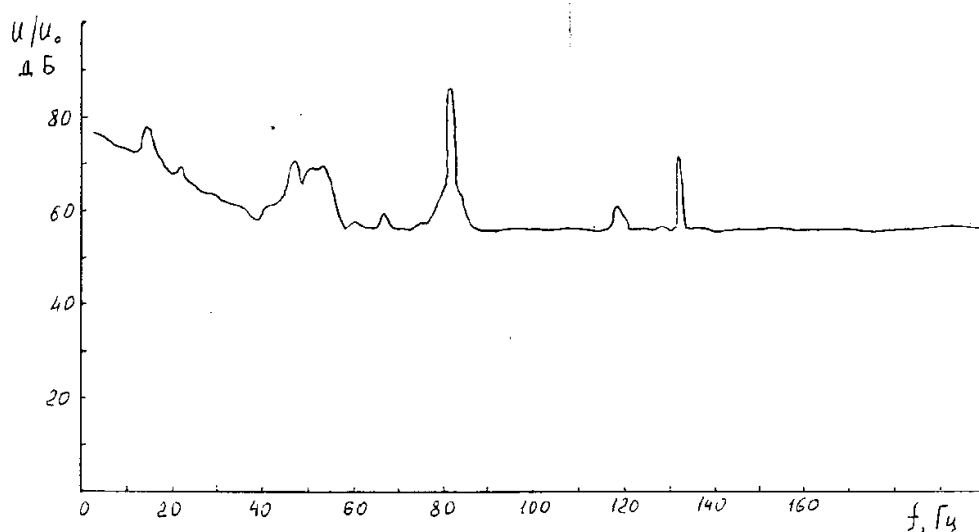


Рисунок 4.26 - Спектр напряжения вибродатчика

ниже, чем спектр шума датчика с обтекателями №2. То есть микрофонный эффект не мог явиться причиной появления пиков в спектре шума датчика. Был также измерен спектр шума неподвижного датчика, лежащего на грунте на глубине 40 м во время стоянки буксирующего катера на якорю (кривая 4 на рисунке 4.25). Уровень шума неподвижного датчика во всем диапазоне частот ниже, чем шум в движении. Сравнение кривых 3 и 5 показывает, что на частотах 30 - 50 Гц (то есть в окрестностях частоты резонанса трансформатора) применение обтекателя №2 давало снижение шума датчика близкое к максимально возможному. Превышение уровня шума, измеренного в отсутствие движения, над собственным шумом измерительного тракта говорит о наличии электрических полей естественного или промышленного происхождения, которые зарегистрировал датчик. Сделана оценка абсолютной величины этого шума. Пересчет ко входу предварительного усилителя и полосе 1 Гц дает значение порядка  $10^{-8} \text{ В} / \sqrt{\text{Гц}}$ . Если считать в диапазоне 30...50 Гц спектральную плотность шума датчика в состоянии покоя постоянной, то по форме кривой 4 (рисунок 4.25) можно оценить значение добротности  $Q$  входного контура, образованного датчиком и первичной обмоткой входного трансформатора. Ее величина составляет 2...4. Соответственно величина шума датчика в состоянии покоя в  $Q$  раз меньше, то есть составляет около  $5 \text{ нВ} / \sqrt{\text{Гц}}$ . В это значение входит и собственный шум датчика. Следовательно, напряженность внешнего электрического поля составляет менее  $5 \text{ нВ} / \text{м} \sqrt{\text{Гц}}$ , что не противоречит данным по атмосферным помехам (рисунок 1.1). Поскольку измеренные спектры шума датчика в движении более чем на 20 дБ выше спектра шума измерительного тракта в движении (кривая 4), то проведенные измерения можно считать достоверными. Для кривой 5 область достоверных значений лежит в диапазоне частот 15 - 75 Гц. Основываясь на результатах выполненных измерений шума датчика, можно сделать вывод о необходимости защиты электродов от набегающего потока обтекателями. При этом необходимо правильно выбрать размер, количество и расположение электроконтактных отверстий на обтекателе, а также обеспечить полное вытеснение воздуха из обтекателя.

#### 4.6. Измерение пульсаций скорости жидкости с помощью электродного датчика

Установленная связь пульсаций электродного потенциала с пульсациями скорости позволяет измерять пульсации скорости жидкости, в частности, при исследовании турбулентности в потоке жидкости. Для этого автором предложено устройство, (рисунок 4.27) признанное изобретением [93]. Устройство содержит диэлектрический корпус 1, плотно собранные в пучок или жгут измерительные электроды 2, дополнительный электрод 3 и измерительный блок 4, включающий в себя усилители 5 и сумматор 6. Корпус 1 выполнен в виде цилиндра, вдоль оси которого установлен жгут 2 из измерительных электродов. Они выполнены в виде проволоки, боковая поверхность которых покрыта слоем изоляции, а шлифованные торцевые поверхности находятся в одной плоскости и имеют электрический контакт с жидкостью. Для достижения высокой механической прочности проволоки склеены между собой. Дополнительный электрод 3 выполнен в виде полоого

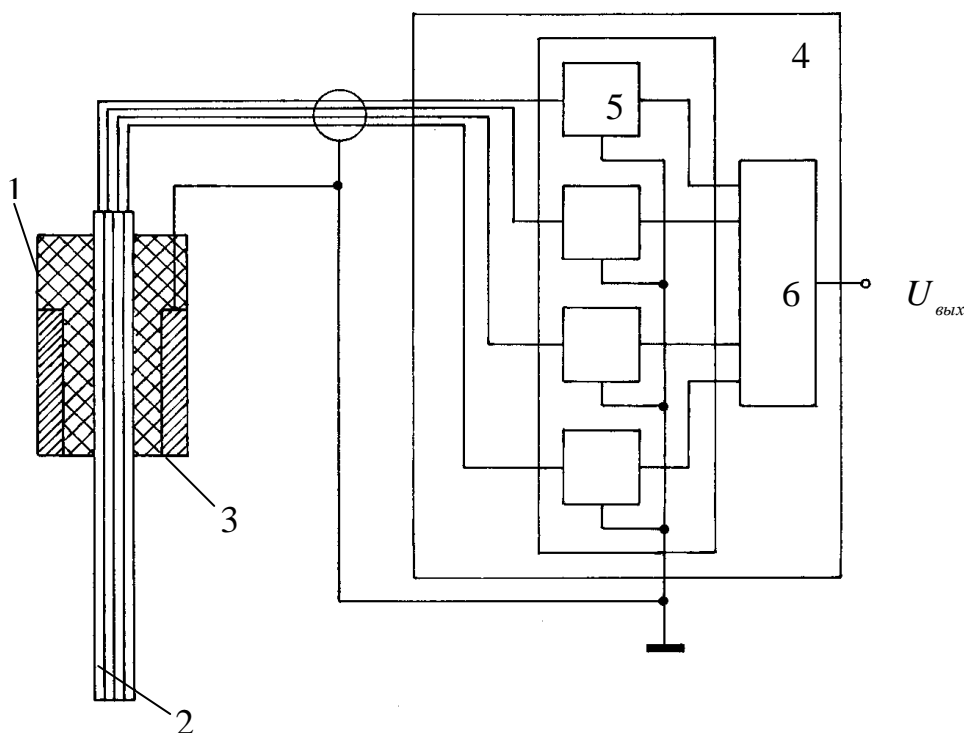


Рисунок 4.27 - Устройство для измерения пульсаций скорости потока жидкости



металлического цилиндра, установленного на боковой поверхности корпуса 1. Жгут 2 измерительных электродов установлен внутри дополнительного электрода так, что его торец выступает за край дополнительного электрода 3 на расстояние, превышающее размер зоны турбулентности. Размер зоны турбулентности определяется конкретной задачей измерения и априори известен с точностью, необходимой для выбора длины выступающей части первого электрода. Каждый из измерительных электродов (проволок жгута 2) соединен с входом соответствующего ему усилителя 5, входящего в состав измерительного блока 4, выходы усилителей подключены к входам сумматора 6, а дополнительный электрод 3 соединен с общей шиной измерительного блока. Для защиты от помех измерительные электроды соединены с усилителями 5 экранированным проводом. Для достижения высокой точности необходимо, чтобы площадь дополнительного электрода 3 на порядок и более превышала суммарную площадь торцевой поверхности измерительных электродов. Кроме того, он должен располагаться вне зоны турбулентности, где пульсации жидкости минимальны, и иметь обтекаемую форму, не создающую турбулентности при обтекании его жидкостью. Вся рабочая поверхность дополнительного электрода должна находиться внутри жидкости, поскольку граница раздела жидкость-воздух является источником сильных помех электрохимической природы. Дополнительный электрод не обязательно должен быть жестко механически связан с измерительными электродами. Он может быть установлен отдельно от измерительных электродов внутри жидкости в таком месте, где скорость движения жидкости минимальна, при этом форма его должна оказывать минимальное влияние на течение жидкости в зоне измерений. Предпочтительна обтекаемая форма в виде цилиндра, шара или пластины, поверхность которой параллельна вектору скорости течения жидкости.

Устройство работает следующим образом. Датчик, состоящий из установленных на диэлектрическом корпусе 1 измерительных электродов, выполненных в виде плотно собранных в пучок или жгут 2 изолированных проволок, и дополнительного электрода 3, помещают в поток жидкости так, что вектор скорости

направлен перпендикулярно к оси жгута 2. Торцы жгута 2 располагают в той точке зоны турбулентности, где требуется провести измерение. Переменная составляющая разности потенциалов между шлифованной торцевой поверхностью каждой из проволок и жидкостью определяется переменной составляющей скорости жидкости. Разность потенциалов между поверхностью дополнительного электрода и жидкостью определяется свойствами материала электрода и жидкости и практически постоянна, поскольку, во-первых, дополнительный электрод находится вне зоны турбулентности и пульсации скорости потока в зоне его расположения малы. Во-вторых, площадь электрода много больше, чем суммарная площадь торцевой поверхности измерительных электродов, поэтому флуктуации его потенциала, вызванные пульсацией скорости пренебрежимо малы. В-третьих, цилиндрическая форма дополнительного электрода обеспечивает хорошую обтекаемость и отсутствие турбулентности, вызванной самим электродом. Таким образом, переменная составляющая напряжения между каждым измерительным электродом и дополнительным электродом пропорциональна переменной составляющей, то есть, пульсации, скорости жидкости. Благодаря тому, что измерительные электроды выполнены в виде тонких проволок, плотно собранных в пучок или жгут, размеры торцевой поверхности последнего малы (1мм и менее) по сравнению с размером турбулентных вихрей. Напряжения, поступающие с измерительных электродов на входы усилителей 5, полностью коррелированы, поэтому их выходные напряжения суммируются сумматором 6. Напряжение на выходе измерительного блока 4 вследствие этого увеличивается в  $N$  раз, где  $N$  – число измерительных электродов. Это имеет существенное значение, поскольку, как показали наши экспериментальные исследования, напряжение полезного сигнала, генерируемое на торцевой поверхности каждой проволоки, не превышает долей микровольта. Поскольку некоррелированный тепловой и электрохимический шум торцевой поверхности каждой из проволок суммируется по мощности, то отношение по напряжению полезного сигнала к собственному шуму датчика увеличивается в  $\sqrt{N}$  раз, что обеспечивает повышение точности измерения. Расположение жгута

2 внутри дополнительного электрода 3 обеспечивает экранирование измерительных электродов от внешних электрических полей, что также повышает точность измерения. Выходное напряжение измерительного блока 4 пропорционально переменной составляющей скорости потока  $V$

$$U_{\text{вых}} = kV,$$

где коэффициент пропорциональности  $k$  определяется калибровкой по известному измерителю, например, по термоанемометру. В качестве материала для электродов следует выбирать металлы, обладающие наименьшим собственным электрохимическим шумом, например, титан и нержавеющую сталь, поскольку собственный шум измерительных электродов ограничивает нижний предел измерения флуктуаций скорости. Для практики достаточно, чтобы площадь поверхности дополнительного электрода была не менее чем на порядок больше, чем площадь всей торцевой поверхности измерительного электрода. Разрешающая способность предложенного устройства достигает единиц миллиметров. Полагая, что инерционность датчика определяется выражением (4.20), можно ожидать, что частотный диапазон измеряемых флуктуаций скорости достигает сотен герц. Отсутствие чувствительности к изменению температуры позволяют использовать его при исследовании турбулентности вблизи стенки, температура которой отличается от температуры жидкости. Жгут из склеенных проволок обладает высокой прочностью.

Флуктуации потенциала поверхности электродов передаются на измерительный блок через слой окиси, играющий роль разделительного конденсатора, поэтому нижняя граница частотного диапазона флуктуаций скорости, которые могут быть измерены, определяется как  $f_{\text{н}} \approx 1/2\pi R_{\text{вх}} C$ , где  $R_{\text{вх}}$  - входное сопротивление усилителя 5 измерительного блока,  $C$  - емкость электрода относительно электролита. Электроды из титана и нержавеющей стали имеют удельную емкость относительно электролита 0,02...0,03 мкФ/мм<sup>2</sup>. При площади торцевой поверхности проволоки 0,05 мм<sup>2</sup> и входном сопротивлении усилителя  $R_{\text{вх}} = 100$  МОм нижняя граница частотного диапазона составляет около одного герца.

#### *4.7. Краткие выводы*

Созданы две математические модели возникновения шума движения, которые как качественно, так и количественно согласуются с результатами экспериментальных исследований. Первая модель основана на модуляции скорости адсорбции кислорода на поверхность электрода при модуляции толщины диффузионного слоя у поверхности электрода набегающим пульсирующим потоком жидкости. Вторая модель основана на деформации двойного электрического слоя на границе электрод-жидкость набегающим потоком. Шум, возникающий по первой модели, уменьшается с течением времени и при длительной выдержке электродов в море второй механизм возникновения шума движения может стать преобладающим. В лабораторном эксперименте доказана возможность уменьшения шума движения электродного датчика в несколько раз путем выбора размеров и места расположения плоского электрода на плоской диэлектрической поверхности обтекателя. Также этот эксперимент качественно и количественно подтвердил правильность первой модели шума движения.

На основании первой модели шума движения предложен метод уменьшения шума движения датчика путем использования вращающихся электродов. При оптимальных параметрах такого датчика возможно уменьшение шума при пульсациях набегающего потока жидкости до двух порядков. Также в лабораторном и натурном эксперименте доказана эффективность применения обтекателей для уменьшения шума движения электродного датчика. Результаты натурального эксперимента, показавшие возможность уменьшить шум электродного датчика при движении до 10 раз по сравнению с незащищенными электродами, признаны Научным советом АН СССР важными и включены в «Отчет о важных и важнейших результатов научных исследований в области статистической радиофизики за 1989 год», представленный Научным советом в Отделение общей физики и астрономии АН СССР (Приложение А).

## **Глава 5. Особенности конструкции высокочувствительных электродных датчиков и приемных устройств для радиосвязи с подводным объектом [97-105]**

### ***5.1. Электродные датчики, предназначенные для работы на движущихся объектах***

Как было показано в главах 3 и 4, величина шума движения определяется пульсацией скорости потока жидкости у поверхности электродов. Поэтому при разработке электродных датчиков, устанавливаемых на движущихся объектах или подлежащих буксировке, основное внимание нужно уделять уменьшению скорости движения жидкости у поверхности электродов. В общем случае среднеквадратичная величина шумового напряжения определяется среднеквадратичной величиной пульсации скорости. Уменьшение средней скорости обтекающей электрод жидкости ведет и к уменьшению величины пульсации скорости. Для уменьшения средней скорости жидкости можно использовать конструктивные элементы, увеличивающие гидродинамическое сопротивление для текущей жидкости, а также непроточные каналы, заполненные проводящей жидкостью, т.е. гидроканалы [12] (Кочанов). Увеличение гидродинамического сопротивления может быть достигнуто путем использования пористых перегородок, представляющих собой систему капиллярных трубок, или, в крайнем случае, длинные узкие гидроканалы, соединяющие камеры датчика, где находятся электроды, с окружающей средой. Течение жидкости в длинном узком гидроканале или капилляре имеет ламинарный характер независимо от того, имеется ли турбулентность на входе капилляра [53] (Рейнольдс). Однако отсутствие турбулентных вихрей еще не означает, что отсутствует и пульсация скорости, хотя, несомненно, она в значительной мере может быть снижена. Кроме того, при использовании гидроканалов в виде длинных узких труб возникает трудность заполнения их жидкостью. В случае образования воздушных пробок датчик становится неработоспособным, а оставшиеся

воздушные пузырьки обладают упругостью и являются причиной возникновения электрокинетической помехи типа "потенциал протекания" [48,54] (Касимзаде, Харин). Если же воздушный пузырек прилипает к поверхности электрода, то граница воздух-жидкость является столь сильным источником помехи, что датчик также становится практически неработоспособным. Таким образом, датчики, использующие непроточные гидроканалы, имеют эксплуатационный недостаток, заключающийся в сложности заполнения гидроканалов жидкостью без воздушных пузырьков. Этот недостаток становится существенным, если датчик по условиям эксплуатации часто вынимается из воды. Нам отчасти его удалось преодолеть в датчике [97], который выполнен в виде V-образной диэлектрической трубы 1 с водонепроницаемой диэлектрической перегородкой 2 в среднем сечении. По обе стороны от перегородки установлены контактные электроды 3 и 4 с выводами 5 для подключения к приемному устройству (рисунок 5.1). При помещении датчика в море вода полностью заполняет внутреннюю полость трубы, обеспечивая электрический контакт электродов с внешней средой через гидроканалы, роль которых выполняют плечи трубы. Благодаря тому, что плечи трубы обращены вверх, образуя с горизонталью угол 5-10 градусов, обеспечиваются условия для полного вытеснения воздуха водой при погружении. При наличии внешнего электрического поля между концами трубы возникает разность потенциалов

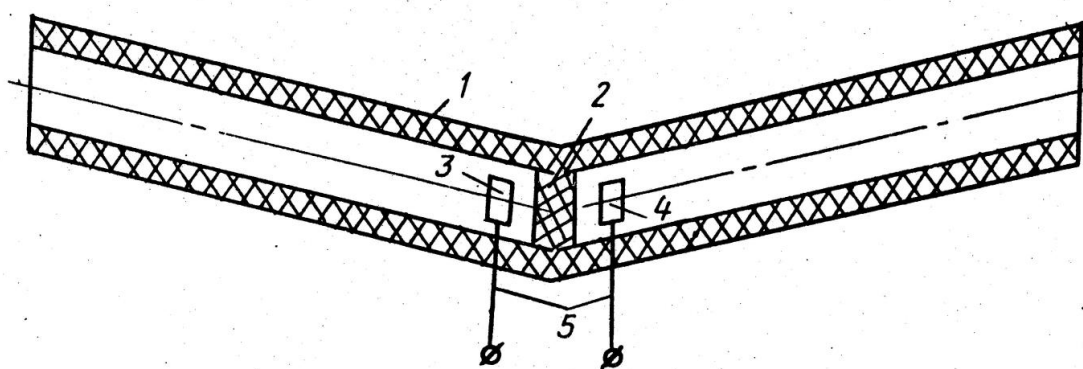


Рис. 5.1. Датчик электрического поля в воде с V – образными гидроканалами.

$$U = El, \quad (5.1)$$

где  $E$  - напряженность электрического поля,  $l$  - проекция расстояния между концами трубы на направление вектора электрического поля. Для надежной защиты электродов от турбулентных вихрей необходимо выполнять гидроканалы с большим отношением длины к диаметру. Но это, во-первых, ведет к увеличению электрического сопротивления датчика, то есть к росту теплового шума, во-вторых, вследствие непроточности гидроканалов, затрудняет заполнение их водой.

Другой путь уменьшения шума движения электродных датчиков состоит в использовании пористых диэлектрических перегородок для защиты электродов от воздействия потока жидкости. Предложенные нами датчики [98,99] выполнены в виде проточной диэлектрической трубы 5, в среднем сечении и в торцах которой, установлены перегородки 6,7,8 из пористого диэлектрика (рисунок 5.2).

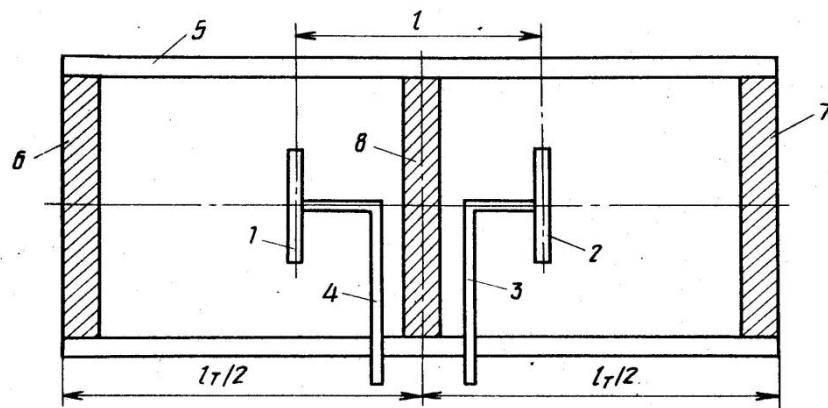


Рисунок 5.2 - Электродный датчик с пористыми перегородками

По обеим сторонам от центральной перегородки установлены два контактных электрода 1 и 2 с выводами 3 и 4. Расстояние  $l$  между электродами выбирается из условия компенсации электрокинетической помехи типа "потенциал протекания", возникающей на пористых перегородках. Эта помеха возникает при просачивании электролита сквозь капилляры в диэлектрике. Внутри капилляра, имеющего отношение длины к диаметру порядка 10 и более, характер течения жидкости все-

гда ламинарный. За счет упорядоченного вовлечения в движение диффузной части двойного электрического слоя между торцами капилляра устанавливается разность потенциалов

$$U_n = \frac{\Delta P \varepsilon_a \zeta}{4\pi\eta\sigma}, \quad (5.2)$$

где  $\Delta P$  - разность давлений между торцами капилляра,  $\varepsilon_a$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость жидкости,  $\zeta$  - электрокинетический потенциал диэлектрика, в котором выполнен капилляр,  $\eta$  - динамическая вязкость жидкости,  $\sigma$  - электрическая проводимость жидкости [54] (Харин). Более точная формула, определяющая потенциал протекания для пористой системы, учитывает размеры капилляров и частоту пульсаций разности давлений  $\Delta P$ . При частоте пульсации давления большей, чем  $f_n = \nu / 2\pi a^2$ , где  $a$  - радиус капилляра,  $\nu$  - кинематическая вязкость жидкости, потенциал протекания уменьшается пропорционально  $\sqrt{f}$  [48] (Касимзаде). Для водных электролитов при  $a = 0,1$  мм предельная частота  $f_n = 15$  Гц. При погружении датчика в море, вода через пористые перегородки полностью заполняет внутренний объем трубы. Проточность объема гарантирует полное вытеснение воздуха. При буксировке датчика или обтекании его потоком вода турбулизуется на закрытых перегородками торцах в гораздо меньшей степени, чем на открытых. При этом, поскольку пористая перегородка представляет собой систему капилляров, образующиеся вихри не проходят к контактным электродам. Однако вследствие перепадов давления между торцами диэлектрической трубы возникает просачивание воды сквозь пористые перегородки, сопровождаемое возникновением "потенциала протекания". При правильном выборе расстояния между электродами разность потенциалов между ними, создаваемая электрокинетическими эффектами на пористых перегородках, равна нулю. В нашей работе [98] показано, что при использовании идентичных тонких пористых диэлектрических перегородок и электродов в виде тонких пластин для компенсации электрокинетической помехи расстояние между электродами должно составлять



$$l = l_m \frac{1 + r_e / r_m}{3}, \quad (5.3)$$

где  $l_m$  - длина диэлектрической трубы,  $r_e$  - сопротивление воды, окружающей датчик, между торцами трубы,  $r_m$  - сопротивление внутреннего объема трубы при заполнении ее водой. При этом расстояние между электродами близко к  $l_m/3$ , а действующая длина датчика не превышает  $1/3$  от его фактической длины.

Покажем, что увеличением толщины средней пористой перегородки действующая длина датчика может быть приближена к его фактической длине. Рассмотрим эквивалентную схему датчика (рисунок 5.3), где:  $e_n$  - ЭДС помех, возникающих на пористых перегородках 6 и 7 вследствие образования «потенциала протекания»,  $e_c$  - ЭДС сигнала,  $r_1$  - сопротивление столба воды в диэлектрической трубе между электродами 1 и 2,  $r_2$  - сопротивление столба воды в диэлектрической трубе между электродом 1 и пористой перегородкой 6,  $r_3$  - сопротивление столба воды в диэлектрической трубе между электродом 2 и пористой перегородкой 7. Сопротивление пористых перегородок 6 и 7 обозначим через  $r_n$ .

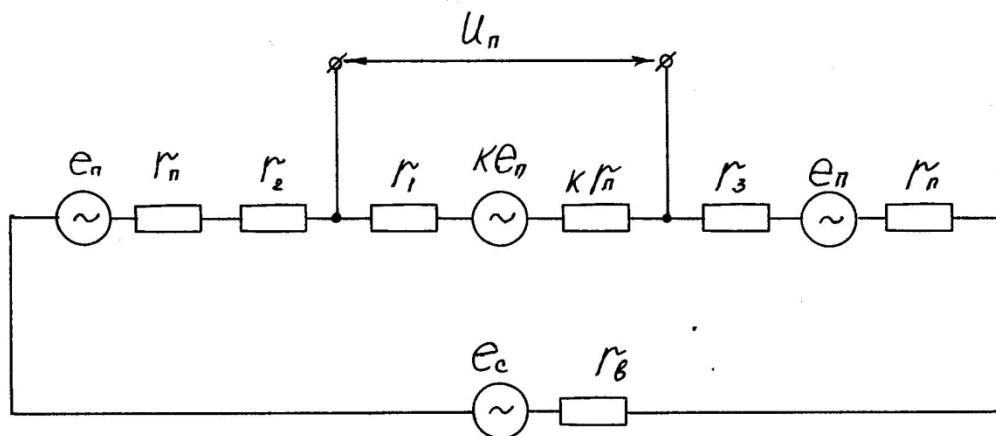


Рисунок 5.3 - Эквивалентная схема датчика

Поскольку толщина пористой перегородки 8 в  $k$  раз больше, чем у перегородок 6 и 7, ее сопротивление равно  $k r_n$ , а ЭДС помех, возникающих на пористой перегородке 8 вследствие эффекта «потенциала протекания» равна  $k e_n$ . Электриче-

ская цепь, содержащая три указанные источника ЭДС помех, замкнута на внешнее сопротивление  $r_6$  морской воды, окружающей датчик, между торцами диэлектрической трубы. Напряжение помехи  $U_n$ , возникающее между электродами 1 и 2 вследствие «потенциала протекания»,

$$U_n = ke_n - i(kr_n + r_1), \quad (5.4)$$

где

$$i = \frac{2e_n + ke_n}{r_1 + r_2 + r_3 + 2r_n + kr_n + r_6}. \quad (5.5)$$

Найдем условия равенства нулю напряжения  $U_n$  между электродами.

$$ke_n - \frac{2e_n + ke_n}{r_1 + r_2 + r_3 + 2r_n + kr_n + r_6}(kr_n - r_1) = 0 \quad (5.6)$$

Отсюда

$$k = \frac{2r_1}{r_2 + r_3 + r_6}. \quad (5.7)$$

Обозначим расстояние между электродами через  $l$ , длину диэлектрической трубы 5 через  $l_m$ , а толщину пористых перегородок 6 и 7 через  $\Delta$ . Тогда

$$r_1 = (l - k\Delta) / \sigma S, \quad (5.8)$$

где  $\sigma$  - проводимость морской воды,  $S$  - площадь внутреннего поперечного сечения диэлектрической трубы 5.

$$(r_1 + r_3) = (l_m - 2\Delta - l) / \sigma S. \quad (5.9)$$

Из (5.7) - (5.9) получим

$$k = \frac{2l}{l_m - l + r_6 \sigma S}. \quad (5.10)$$

Действующая длина датчика определяется расстоянием  $l$  между электродами

$$l = \frac{k(l_m + r_6 \sigma S)}{k + 2} \quad (5.11)$$

Если все пористые перегородки идентичны, то действующая длина датчика составляет около 1/3 от его геометрической длины. ЭДС сигнала на выходе такого датчика до трех раз меньше, чем у датчика обычной конструкции такой же длины.

Увеличение толщины средней пористой перегородки в  $k$  раз по сравнению с торцевыми перегородками 6 и 7 дает возможность приблизить действующую длину к геометрической длине датчика. Наши эксперименты (в том числе натуральный эксперимент) показали, что при движении происходит увеличение шума датчика в десятки раз, поэтому даже при указанном уменьшении ЭДС сигнала при точной настройке датчика можно рассчитывать на увеличение отношения сигнал - шум до 10 раз. Наш лабораторный эксперимент показал, что увеличением теплового шума датчика при применении пористых перегородок с высокой проницаемостью можно пренебречь. Проницаемостью пористой перегородки мы называем отношение площади отверстий капилляров к всей площади пористой перегородки, при том, что пористая перегородка выполнена в виде пакета диэлектрических капиллярных трубок, перпендикулярных к ее параллельным поверхностям. Например, при проницаемости перегородки, равной 0,2, сопротивление растекания между электродами датчика (рисунок 5.2) увеличивается не более чем в два раза по сравнению с сопротивлением растекания при расположении тех же электродов в электролите на расстоянии  $l_m$ .

Заметим, что возможность компенсации электрокинетической помехи возникает тогда, когда контактный электрод расположен в проточном объеме на пути электрического тока от одной пористой перегородки к другой, или, в общем случае, от одной группы электроконтактных отверстий обтекателя к другой. При этом выгодно расположить контактный электрод в стороне от потока жидкости, возникающего вследствие флуктуирующей разности давлений между группами электроконтактных отверстий обтекателя, находящемся в турбулизованной жидкости. Кроме того, нет необходимости оба электрода располагать в одном обтекателе, поскольку при большом расстоянии между электродами он становится слишком громоздким. Рассмотрим подробнее некоторые особенности конструкции обтекателей.

Во-первых, следует иметь в виду, что обтекатель, имея существенно большие размеры, чем электрод, может явиться причиной перехода ламинарного ха-

рактера обтекания в турбулентный. При этом абсолютные значения пульсации скорости и давления, а также связанные с ними пульсации потенциала электрода, то есть электродный шум, резко увеличиваются. Поэтому конструкция обтекателя должна в рабочем диапазоне скоростей обеспечивать характер обтекания, близкий к ламинарному, при котором пульсации скорости минимальны. Кроме того, электроконтактные отверстия должны располагаться в тех областях поверхности обтекателя, где минимальны завихрения потока и где сами отверстия не создают дополнительных завихрений. По-видимому, носовая и кормовая части обтекателя являются неблагоприятными для расположения электроконтактных отверстий.

Во-вторых, попытка уменьшить скорость движения жидкости внутри обтекателя путем уменьшения диаметра электроконтактных отверстий приводит к возникновению помехи типа "потенциал протекания". При увеличении диаметра отверстия движение жидкости в нем все более отличается от ламинарного. Вследствие возникновения вихрей внутри канала электроконтактного отверстия разность потенциалов между его торцами падает. Одновременно внутрь обтекателя начинают попадать турбулентные вихри, которые могут достигать поверхности электродов [106] (Лаврентьев). Чтобы этого не произошло, электроконтактные отверстия целесообразно делать в стороне от рабочей поверхности электродов, а расстояние от отверстия до электрода должно как минимум в несколько раз превышать диаметр отверстия  $D$ , чтобы турбулентные вихри размером порядка  $D$  успели существенно ослабиться, подойдя к поверхности электрода. Для обеспечения полного вытеснения воздуха из обтекателя диаметр отверстия не должен быть менее нескольких миллиметров. При наличии остатков невытесненного воздуха упругость последнего позволяет жидкости двигаться внутри обтекателя, увеличивая пульсации скорости жидкости у поверхности электрода, а также вызывает увеличение и электрокинетической помехи за счет "потенциала протекания". При значительном объеме невытесненного воздуха возможно лишь частичное смачивание поверхности электродов, что приводит к катастрофическому росту помех ввиду постоянного нарушения двойного слоя. Можно рекомендовать диаметр электроконтактных отверстий 2...5 мм при отношении длины к диаметру порядка

нескольких единиц. Материал обтекателя должен иметь минимальное значение электрокинетического потенциала, как, например, полипропилен. Количество электроконтактных отверстий должно обеспечивать увеличение активной части импеданса датчика не более чем на порядок, исходя из того, что реальный шум датчика в движении может превышать тепловой в несколько раз. При этом тепловой шум не будет определять его чувствительность. Рассмотрим пример. Пусть электроконтактные отверстия имеют длину 10 мм и диаметр 3 мм. Пусть датчик имеет сферические электроды из титана радиусом 5 см. В соответствии с таблицей 2.5 на частоте 90 Гц сопротивление активной части импеданса датчика при расстоянии между электродами много большем их линейных размеров составляет около 1 Ом. Сопротивление одного электроконтактного отверстия для морской воды с соленостью 35 г/л ( $\sigma = 4$  сим/м) составляет около 350 Ом. Чтобы при установке обтекателей сопротивление датчика увеличилось не более чем в два раза необходимо иметь по 70 таких отверстий на каждом обтекателе. Отметим, что увеличение площади электродов в пределах возможного всегда полезно, поскольку ведет к уменьшению теплового шума. Учитывая отрицательное влияние микрофонного эффекта входного трансформатора, отмеченное в разделе 4.3, у буксируемых датчиков необходимо принять меры по магнитному экранированию входного трансформатора и демпфированию возникающих механических колебаний. Если эти меры все же не приведут к снижению вибропомех до желаемого уровня, то остается возможность применить бестрансформаторный усилитель с параллельным включением транзисторов в первом каскаде [39,40] (Терпугов, Жалуд). Однако следует иметь в виду, что коэффициент шума у такого усилителя значительно выше, чем при трансформаторном согласовании.

Кабельный электродный датчик (раздел 1.3) применяется в качестве приемной антенны при радиосвязи в СНЧ диапазоне с движущимся подводным объектом. Недостатком известного кабельного датчика является значительный уровень собственного шума при буксировке за судном, и, вследствие этого, невысокая чувствительность, которая вынуждает увеличивать расстояние между электродами до сотен метров. Столь большие размеры датчика создают огромные

эксплуатационные неудобства. В местах контакта с оболочкой кабеля при его изгибах поверхность спирального проволочного электрода подвергается механическому воздействию, нарушается окисная пленка на поверхности металла, а это, как показано в разделе 2.1, приводит к сильному импульсному шуму. Кроме того, внешняя сторона проволочного электрода получает механические повреждения при наматывании и разматывании кабеля на лебедку, поскольку только в смотанном состоянии датчика возможен заход судна в порт. Также при движении незащищенная поверхность электродов подвергается воздействию набегающего потока воды, что является причиной специфического электродного «шума движения», который рассмотрен в разделах 3.1 и 3.2. Диссертантом предложены две конструкции кабельных электродных датчиков, имеющих меньший уровень собственного шума датчика и более высокую чувствительность [100,101].

На рисунке 5.4 схематично изображен кабельный электродный датчик, содержащий двухпроводный кабель 1 с первым 2 и вторым 3 проводами и первый 4 и второй 5 электроды. На рисунке 5.5 показана конструкция электрода в обтекателе. Электрод 4 заключен в эластичную трубу 6 с отверстиями, являющуюся обтекателем. Диэлектрические втулки 7 позволяют увеличить внутренний диаметр трубы 6 и сделать конструкцию электрода более технологичной. Оба электрода имеют идентичную конструкцию. На рисунке 5.6 показан вариант конструкции электрода в обтекателе, в котором пространство между электродом и кабелем заполнено вязким гелеобразным диэлектриком. Датчик работает следующим обра-

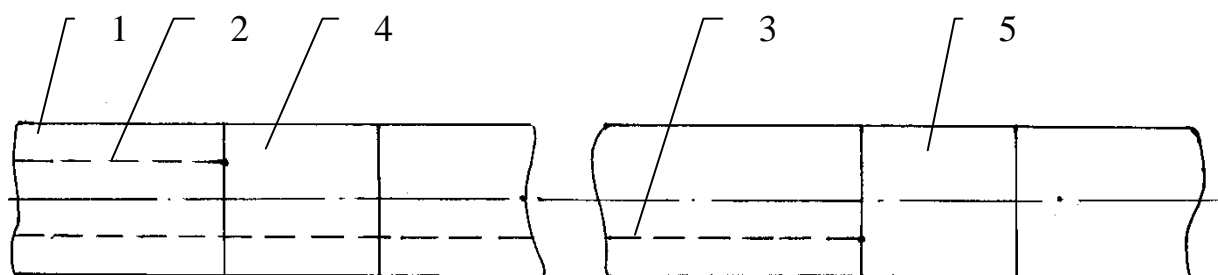


Рисунок 5.4 - Кабельный электродный датчик

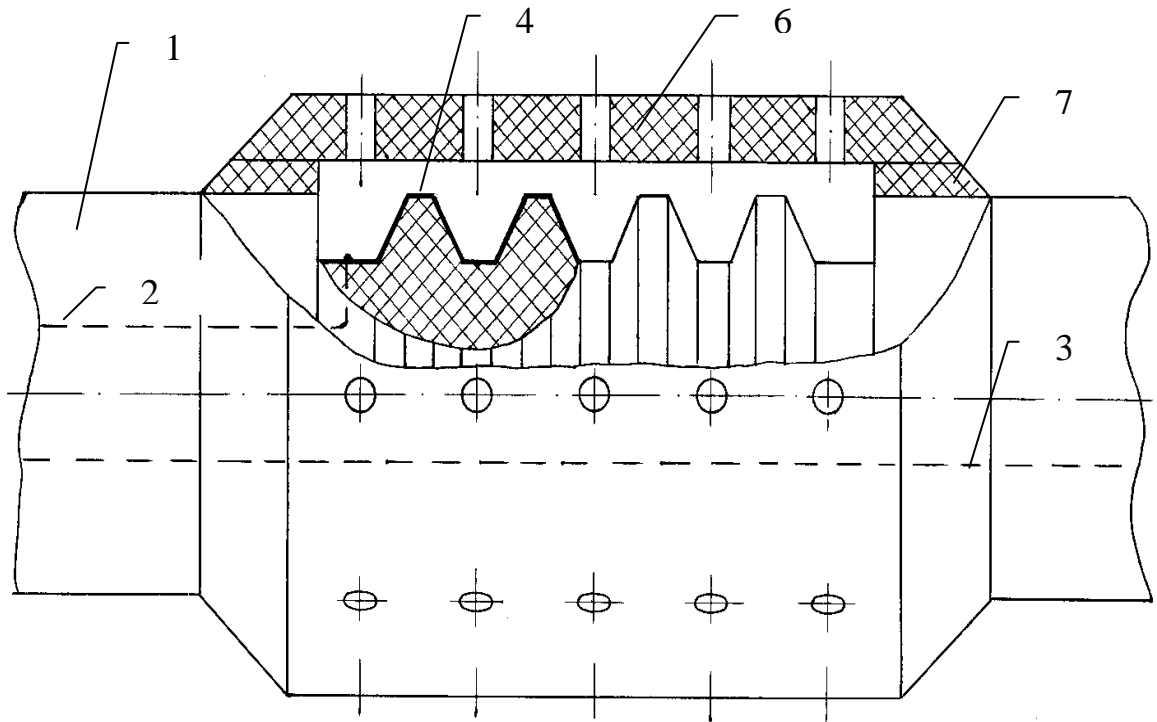


Рисунок 5.5 - Конструкция электрода в обтекателе

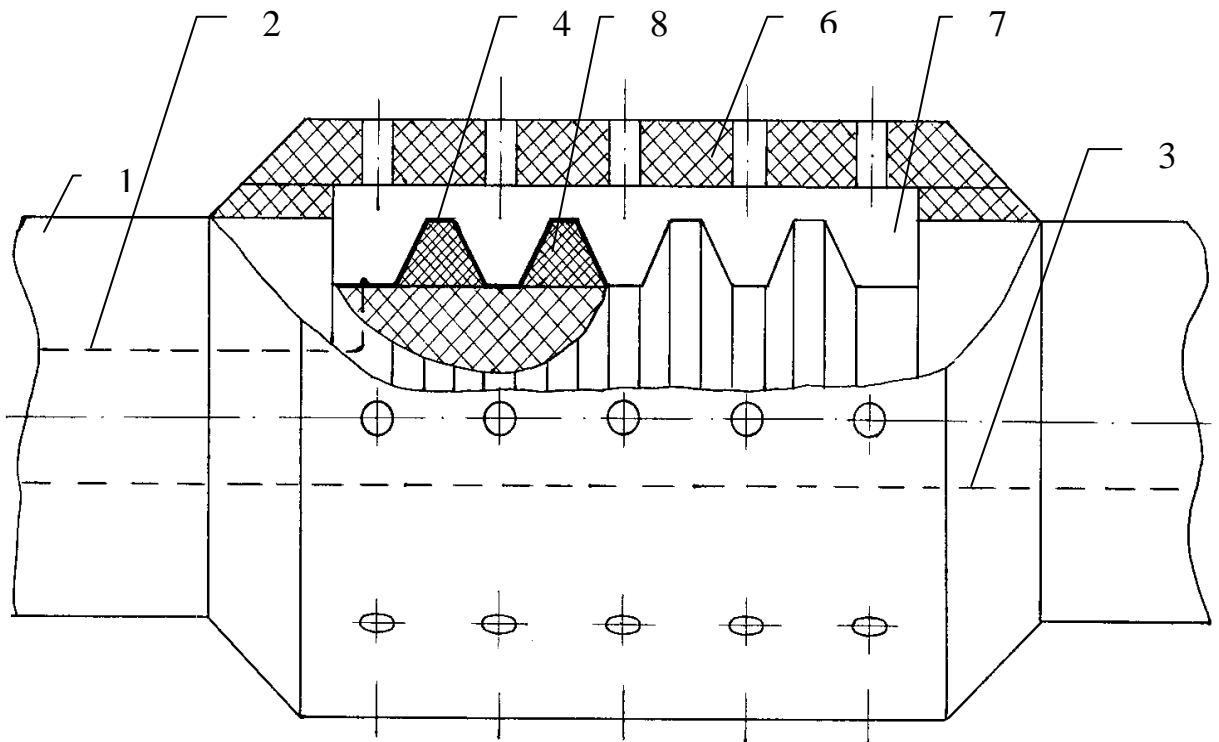


Рисунок 5.6 - Конструкция электрода в обтекателе с гелеобразным диэлектриком

зом. Датчик в заглубленном состоянии за правый конец кабеля тянут за буксирующим судном. Существующее в море переменное электрическое поле создает между электродами разность потенциалов  $U = Ed$ , где  $E$  - напряженность электрического поля, а  $d$  - расстояние между электродами. По кабелю эта разность потенциалов поступает на регистрирующую аппаратуру на борту судна. Поскольку внутренняя поверхность электрода, обращенная к оболочке кабеля, покрыта диэлектриком, то есть она не имеет электрического контакта с окружающей его морской водой, то и не возникает специфический электрохимический шум при неизбежных изгибах кабеля при буксировке. Обтекатель защищает электрод от механических повреждений и от прямого воздействия турбулентных вихрей, которые тоже вызывают специфический электродный шум. Электрический контакт электрода с внешней средой обеспечивается наличием отверстий в обтекателе. Внутренний диаметр трубы обтекателя больше внешнего диаметра электрода, поэтому при изгибах датчика электрод не задевает за обтекатель и его поверхность не повреждается. Однако для предотвращения случайных повреждений электрод в области максимального диаметра, то есть на гребнях, имеет диэлектрическое покрытие. Выполнение электродов в виде гофрированной металлической трубы дает возможность увеличить их площадь и тем самым еще уменьшить шум датчика.

В качестве материала для электродов следует выбирать металлы, обладающие наименьшим собственным электрохимическим шумом, например, титан или нержавеющую сталь. Поверхность электродов полируется. Диэлектрическое покрытие должно иметь высокую прочность к истиранию. Практическое осуществление такой конструкции электрода целесообразно без нарушения целостности кабеля и уменьшения его механической прочности. Это возможно при формировании гофров на тонкостенной металлической трубе уже надетой на кабель и установленной в требуемом месте. При этом на диэлектрической оболочке кабеля могут быть заранее сформированы гребни, к которым, как показано на рисунке 5.5, без зазоров прилегает сформированный металлический электрод. Поверхность оболочки кабеля может иметь цилиндрическую форму, а пространство



между кабелем и внутренней поверхностью электрода заполнено вязким гелеобразным диэлектриком. Гелеобразный диэлектрик выполняет следующие функции. Во-первых, он не позволяет давлению воды на рабочей глубине датчика деформировать электрод. Во-вторых, благодаря своей вязкой консистенции, он не вытекает и удерживается внутри электрода при его формовке на кабеле и дальнейшей эксплуатации. В-третьих, он улучшает изоляцию внутренней поверхности электрода относительно внешней среды. При установке обтекателя на кабель целесообразно использовать втулки, увеличивающие внутренний диаметр обтекателя.

На рисунке 5.7 показана конструкция электрода в обтекателе, который не выступает за внешний габарит кабеля и не мешает намотке кабельного датчика на барабан лебедки. Здесь 1 – двухпроводный кабель, 2,3 – первый и второй провод кабеля, 4 – электрод в виде спирали из проволоки, соединенный с первым проводом 2 кабеля, 6 – обтекатель в виде гибкой диэлектрической перфорированной трубы, 7 – диэлектрическая оболочка кабеля. На диэлектрической оболочке 7 кабеля 1 сформирована спиральная канавка 8, в которую уложен электрод 4, сечение которого имеет форму полукруга. Плоской внутренней стороной электрод 4 приклеен к диэлектрической оболочке 7 кабеля 1.

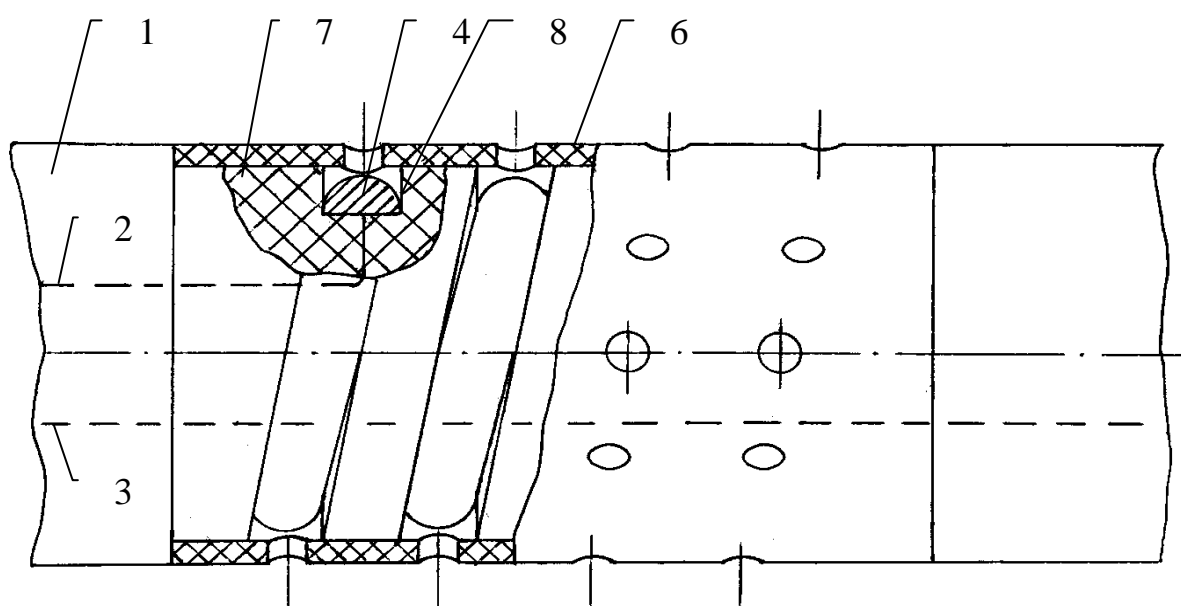


Рисунок 5.7 - Конструкция электрода в обтекателе, не выходящем за габарит кабеля

Датчик работает следующим образом. Датчик в заглубленном состоянии за левый конец кабеля 1 (рисунок 5.4) тянут за буксирующим судном. Существующее в море переменное электрическое поле создает между электродами 4 и 5 разность потенциалов  $U = Ed$ , где  $E$  - напряженность электрического поля, а  $d$  - расстояние между электродами. По кабелю 1 эта разность потенциалов поступает на регистрирующую аппаратуру на борту судна. Благодаря наличию перфораций в трубе обтекателя 6 электроды датчика имеют электрический контакт с внешней средой, что обеспечивает его работоспособность. При этом обтекатель 6 защищает поверхность электрода от прямого воздействия набегающего потока жидкости, что позволяет уменьшить «шум движения» датчика и увеличить его чувствительность. Внутренний диаметр трубы обтекателя 6 больше внешнего диаметра спирального электрода 4, поэтому при изгибах кабеля труба обтекателя не касается электрода и не вызывает повреждений окисной пленки на его поверхности. В частности, это требование выполняется, если глубина канавки 4 превышает толщину проволоки, из которой выполнен электрод 4. Внешний диаметр трубы обтекателя равен диаметру кабеля, что улучшает эксплуатационные характеристики датчика (упрощает его намотку и размотку) и исключает турбулизацию потока вблизи электрода самим обтекателем. Технологически просто выполнить обтекатель из термоусадочной трубки. Проволока, из которой выполнен электрод 4, имеет сечение в виде полукруга. Своей плоской стороной она приклеена к диэлектрической оболочке кабеля, что исключает ее контакт с внешней средой и возможность повреждения поверхности при изгибах кабеля. Плоская поверхность позволяет технологически проще и надежнее осуществить склеивание проволоки с оболочкой кабеля. Тем самым исключается появление сильного импульсного шума и повышается чувствительность датчика. Внешняя сторона проволоки имеет вид цилиндрической поверхности, что увеличивает ее площадь по сравнению с плоской поверхностью, следовательно, уменьшает сопротивление датчика, являющееся источником его теплового шума.

## ***5.2. Повышение чувствительности приемного устройства путем компенсации шума движения***

В предыдущих разделах установлено, что пульсации скорости жидкости относительно электрода создают пропорциональные и синфазные им пульсации электродного потенциала, что создает возможность для компенсации последних. В разделе 3.1 описан эксперимент, который был проведен на лабораторной установке, изображенной на рисунке 3.2. На крышке герметично закрытой стеклянной ванны были установлены две пары электродов из некорродирующего металла. Обе пары электродов находились в одном потоке жидкости. В этом случае одна пара электродов выступала в роли датчика пульсаций скорости. При дифференциальном подключении к предварительному усилителю двух пар электродов пик в спектре электродного шума на частоте 3 Гц, соответствующей частоте пульсаций скорости потока, вызванной неравномерностью вращения вертушки, уменьшился в 4 раза. В экспериментах, проведенных на установке, показанной на рис.3.5, коэффициент корреляции между электродным напряжением и пульсациями скорости составил 0,71, а между напряжениями двух пар электродов – 0,87. Это свидетельствует о возможности компенсации большей части «шума движения», если использовать для ее реализации напряжение, пропорциональное пульсациям скорости жидкости относительно электродов.

Диссертантом выполнен эксперимент, доказывающий осуществимость такой компенсации. Для проведения эксперимента лабораторная установка, показанная на рисунке 3.16, была доработана в соответствии с рисунком 5.8. В отличие от рисунка 3.16 цифрами обозначены: 17 – измерительный усилитель, 18 – аналого-цифровой преобразователь, 19 – компьютер. На крышке герметично закрытой измерительной ячейки из оргстекла были установлены два электрода, выполненных из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, т. е. из некорродирующего металла, поскольку корродирующие электроды имеют высокий уровень коррозионного шума. Жидкость (раствор NaCl с концентрацией 4,5 г/л) приводилась в движение центробежным насосом и по диэлектрическому трубопроводу со скоро-

стью 1 м/с поступала в имитирующую датчик электрического поля измерительную ячейку. Первый (измерительный) электрод диаметром 2,5 мм находился непосредственно против сопла впускной трубы в потоке жидкости, второй (опорный) электрод диаметром 9 мм, площадь которого много больше площади измерительного электрода, находился в стороне от потока. Поэтому флуктуации напряжения между электродами обусловлены, в основном, процессами на поверхности измерительного электрода.

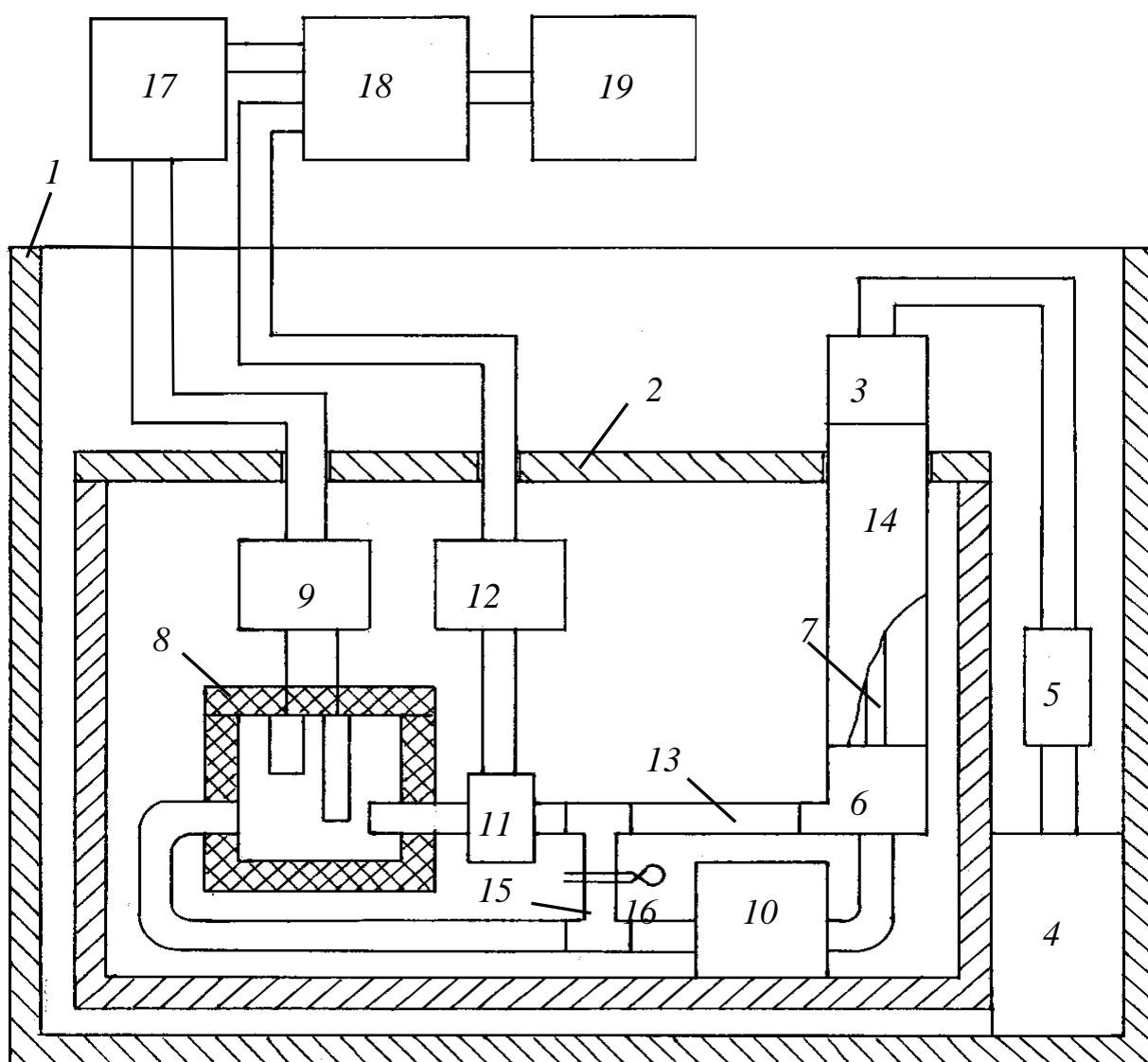


Рисунок 5.8 - Установка для исследования корреляции электродного шума с пульсациями скорости жидкости

Рабочими являются торцевые полированные поверхности цилиндрических электродов, боковые стороны которых изолированы от электролита. В трубопровод встроен оптический датчик скорости жидкости нашей конструкции [78], расположенный на расстоянии 130 мм от измерительного электрода по направлению потока. Напряжение с электродов, усиленное предварительным и измерительным усилителями, а также напряжение с датчика скорости, усиленное вторым предварительным усилителем, поступали на входы двух разных каналов аналого-цифрового преобразователя (АЦП) E10-20. Оцифрованные реализации напряжения электродного шума и напряжения датчика скорости одновременно записывались на компьютер. Результаты измерений обрабатывались с помощью программ LGrat и Excel. Измерительная ячейка, насос с трубопроводом и предварительные усилители располагались в стальном ящике, являющемся магнито- и электростатическим экраном, при этом центробежный насос был связан с электродвигателем, расположенном вне экрана с помощью диэлектрического вала. Такая конструкция установки надежно защищает измерительную ячейку от наводок и помех. Коэффициент усиления тракта измерения электродного напряжения составлял 150000. Каналы измерения электродного шума и пульсаций скорости имели полосу частот от 4 до 100 Гц.

На рисунке 5.9 показаны измеренные реализации шумового напряжения с электродов измерительной ячейки (1) и напряжения с датчика скорости (2). Кривая 3 представляет собой результат вычитания кривой 2 из кривой 1. Напряжение с датчика скорости было масштабировано по амплитуде для достижения значения коэффициента корреляции кривых 2 и 3 равного нулю. Средние значения графиков по оси ординат выбраны для удобства, чтобы кривые не пересекались. Как видно из рисунка 5.9, шумовое напряжение с электродов коррелировано с напряжением датчика скорости. Измеренный коэффициент корреляции составил 0,9. Разностное напряжение (кривая 3) имеет среднеквадратическое отклонение в 2,3 раза меньше, чем исходный электродный шум (кривая 1).

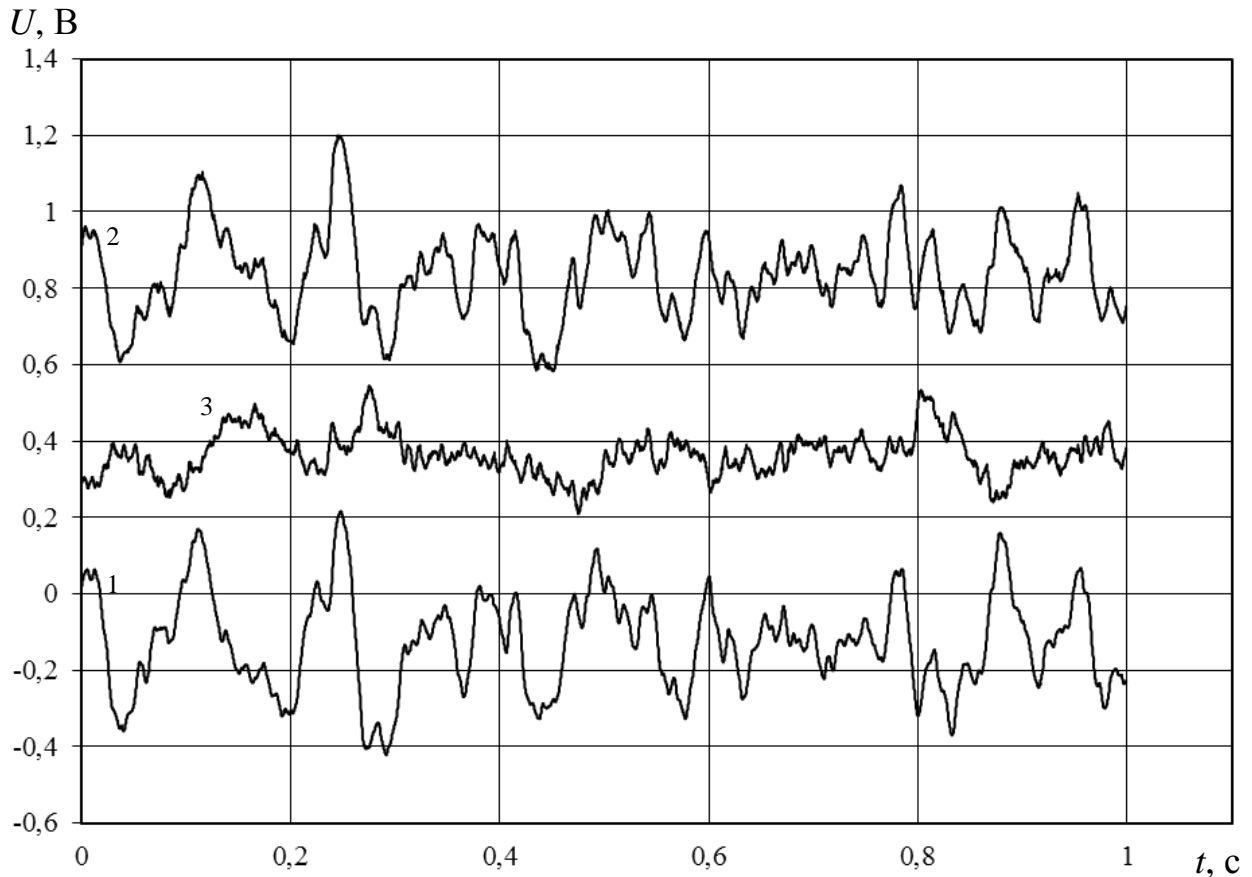


Рисунок 5.9 - Реализации шумового напряжения с электродов измерительной ячейки (1) и напряжения с датчика скорости (2), и (3) - результат вычитания кривой 2 из кривой 1

В разделе 3.2 показано, что электродный шум движения имеет инерционность по отношению к пульсациям скорости жидкости, характеризуемую постоянной времени инерционного  $RC$  звена  $4 \dots 10$  мс. Для точного вычитания спектр выходного напряжения датчика скорости был согласован со спектром электродного шума. Для этого в усилителе датчика скорости был установлен  $RC$  фильтр нижних частот с постоянной времени  $7,5$  мс. На рисунке 5.10 показан усредненный по 20 реализациям спектр электродного шума (1) и согласованный с ним усредненный спектр напряжения на выходе усилителя датчика скорости (2). В диапазоне частот  $4 \dots 92$  Гц оба спектра совпадают по форме и имеют падение на  $30$  дБ. Ноль на оси ординат рисунке 5.10 соответствует спектральной плотности шума  $1 \text{ В}/\sqrt{\text{Гц}}$ .

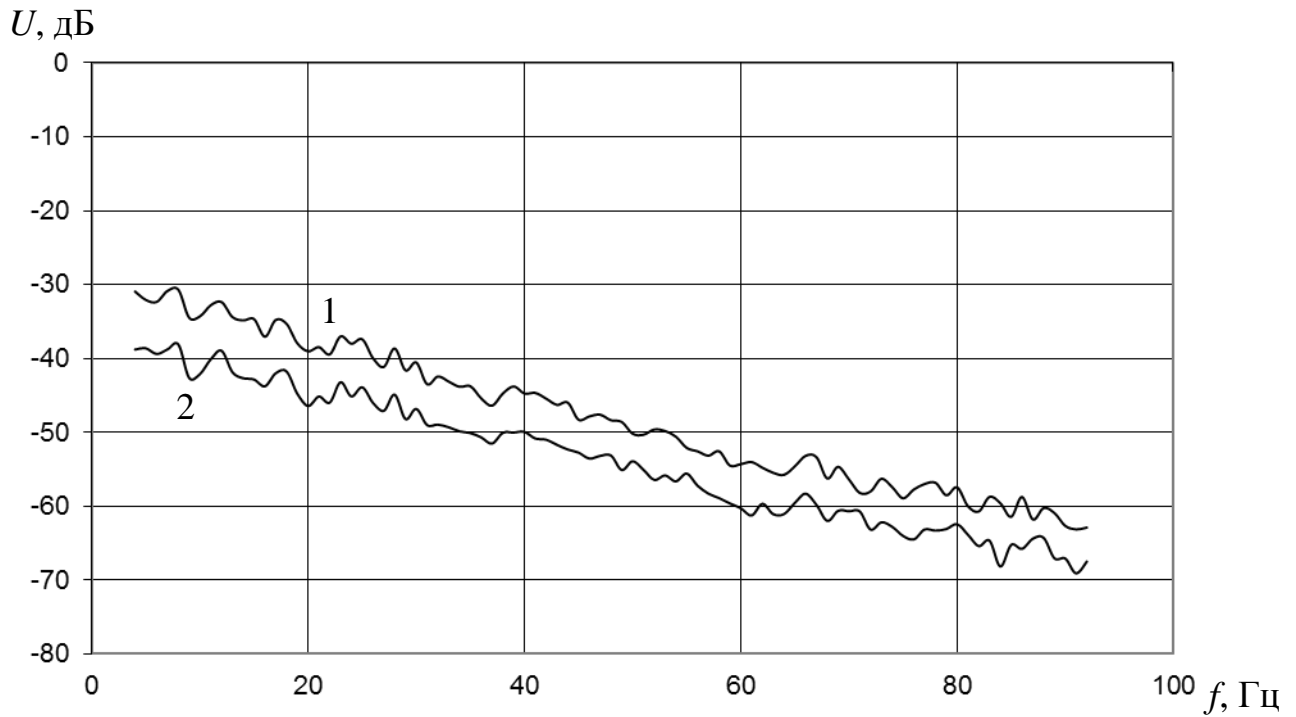


Рисунок 5.10 - Амплитудные спектры напряжения электродного шума (1) и напряжения с датчика скорости жидкости (2)

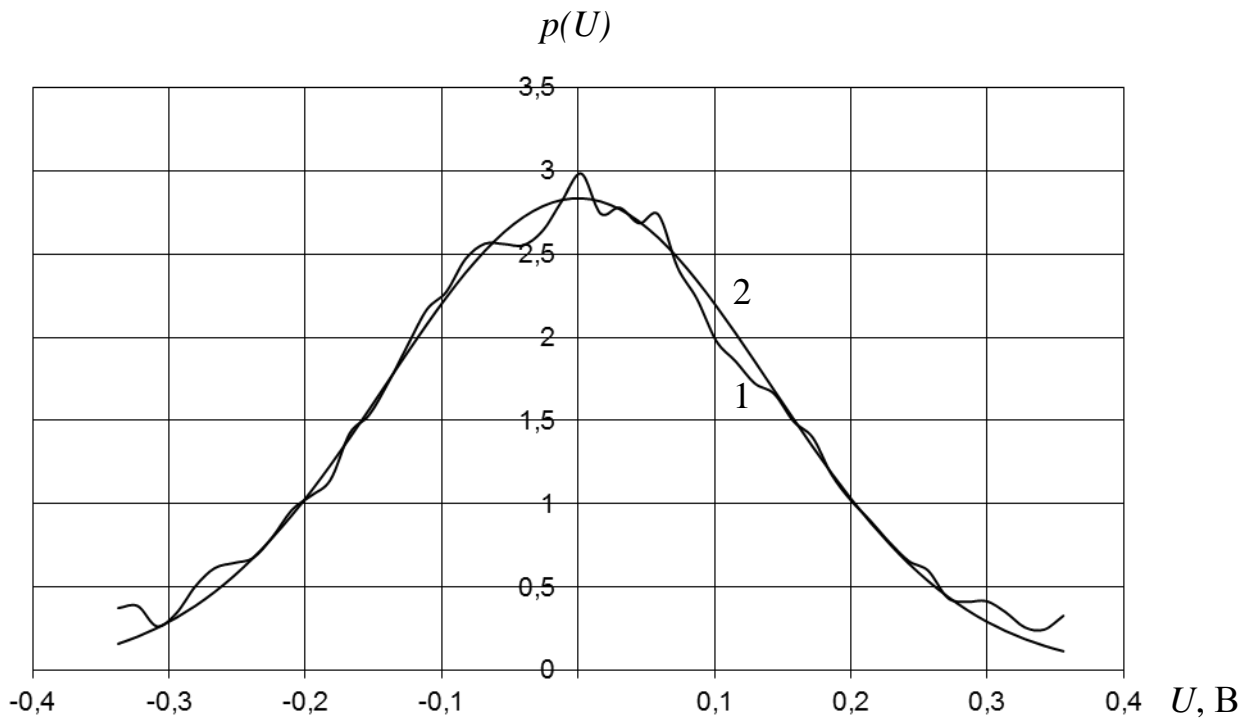


Рисунок 5.11 - Измеренная (1) усредненная функция распределения плотности вероятности для электродного шума и рассчитанная для той же величины среднеквадратического отклонения функция нормального (гауссова) закона распределения (2)

При относительной пульсации скорости потока около 0,5% среднеквадратическое значение шумового напряжения на электродах составило около 1 мкВ.

На рисунке 5.11 показана измеренная (1) усредненная по 20 реализациям функция распределения плотности вероятности для электродного шума и рассчитанная для той же величины среднеквадратического отклонения функция нормального (гауссова) закона распределения (2). Как видно из рисунка, эти функции распределения практически совпадают. Точно так же близок к нормальному и закон распределения флуктуаций скорости (рисунок 5.12).

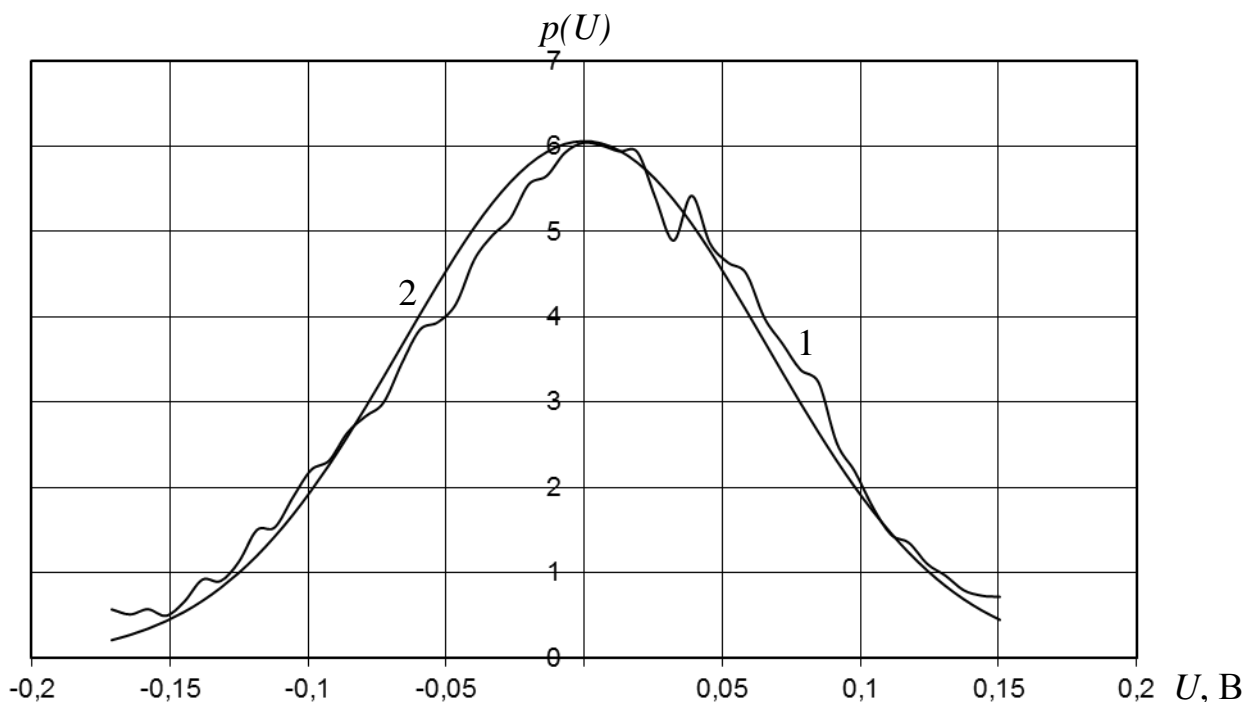


Рисунок 5.12 - Измеренная (1) усредненная функция распределения плотности вероятности для флуктуаций скорости потока жидкости и рассчитанная для той же величины среднеквадратического отклонения функция нормального (гауссова) закона распределения (2)

Измеренные одновременно многочисленными реализациями электродного шума и напряжения датчика скорости имели коэффициент корреляции от 0,7 до 0,9. После вычитания из напряжения электродного шума масштабированного напряжения датчика скорости достигался выигрыш по величине среднеквадратического напряжения электродного шума в 1,3 ... 2,3 раза. Это дает основания утверждать,



что путем компенсации части электродного шума движения возможно увеличение чувствительности приемного устройства более чем в два раза.

Точность измерения напряженности электрического поля определяется величиной собственного шума датчика, которая зависит от условий эксплуатации (скорости движения жидкости, величины пульсаций, солености морской воды), от конструкции и размеров датчика. В эксперименте датчик напряженности электрического поля имитировался парой электродов небольшого размера. В соответствии с рисунком 5.10 спектральная плотность электродного шума на частоте 25 Гц составляет около  $70 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ , на частоте 5 Гц она в 3 раза больше, а на частоте 50 Гц – в три раза меньше. Напряжение электродного шума, обусловленного некоррелированными источниками шумового тока на поверхности электрода, обратно пропорционально квадратному корню из площади электрода (раздел 2.1). Составляющая шума электродного датчика, обусловленного пульсациями скорости жидкости, зависит от степени корреляции пульсаций скорости на разных участках электрода, которая уменьшается с увеличением размеров электрода. Поэтому при увеличении размеров электродов напряжение электродного шума в общем случае уменьшается. В эксперименте площадь измерительного электрода была равна  $4,9 \text{ мм}^2$ . Если электроды датчика выполнить в виде шаров радиусом 60 мм, то площадь электрода увеличится почти в 10000 раз. При этом спектральная плотность напряжения электродного шума составит величину менее  $10 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 25 Гц. На частотах 5 Гц и 50 Гц эти значения соответственно в три раза больше и в три раза меньше. При увеличении скорости жидкости с  $1 \text{ м/с}$  до  $3 \text{ м/с}$  электродный шум увеличивается примерно в 5 раз (раздел 3.1). Компенсация шума движения позволяет уменьшить величину шума датчика более чем в два раза. При скорости жидкости относительно датчика  $3 \text{ м/с}$  без компенсации можно измерять спектральную плотность напряжения порядка  $35 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  с точностью 11%. При расстоянии между электродами датчика 1 м это означает величину измеряемой спектральной плотности напряженности электрического поля порядка  $35 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}} \cdot \text{м}$  без компенсации шума движения. При использовании компен-

сации погрешность измерения составляет 3%, то есть уменьшается почти в 4 раза. Предварительный усилитель электродного датчика должен иметь шумовые характеристики, позволяющие реализовать высокую чувствительность датчика, что является достаточно сложной технической задачей. Точность компенсации составляющей электродного шума, обусловленной пульсациями скорости, зависит от конструкции датчика скорости и его расположения относительно электрода. Компенсирующее напряжение необходимо получать с двухкомпонентных датчиков пульсаций скорости, установленных непосредственно на электродах датчика напряженности электромагнитного поля. В нашем эксперименте применялся однокомпонентный датчик скорости, измеряющий только продольную компоненту скорости потока, он располагался на расстоянии 130 мм от измерительного электрода, при этом его чувствительный элемент сам создавал турбулентные вихри, которые затухали на пути до измерительного электрода. Это не дало возможности получить большее значение выигрыша.

Использование второй пары электродов для формирования компенсирующего напряжения неприменимо на практике, поскольку при этом вычитается не только «шум движения», но и принимаемый полезный сигнал. Компенсирующее напряжение целесообразно получать со специальных датчиков пульсаций скорости, установленных непосредственно на электродах датчика электромагнитного поля. Диссертантом предложена схема приемного устройства, в котором таким образом осуществлена компенсация пульсаций выходного напряжения датчика, вызванных пульсациями скорости жидкости, показана на рисунке 5.13. На это устройство получен патент РФ на изобретение [102,103].

Приемное устройство содержит диэлектрическую платформу *1*, на которой установлены электроды *2* и *3* датчика электрического поля, датчики пульсаций скорости *4* и *5*, установленные соответственно на электродах *2* и *3*, предварительный усилитель *6*, блок вычитания *7*, приемный блок *8*, усилители *9* и *10* с управляемым коэффициентом усиления, коррелометры *11* и *12*. Коррелометры идентичны и содержат соответственно перемножители *13* и *14*, интеграторы *15* и *16*.

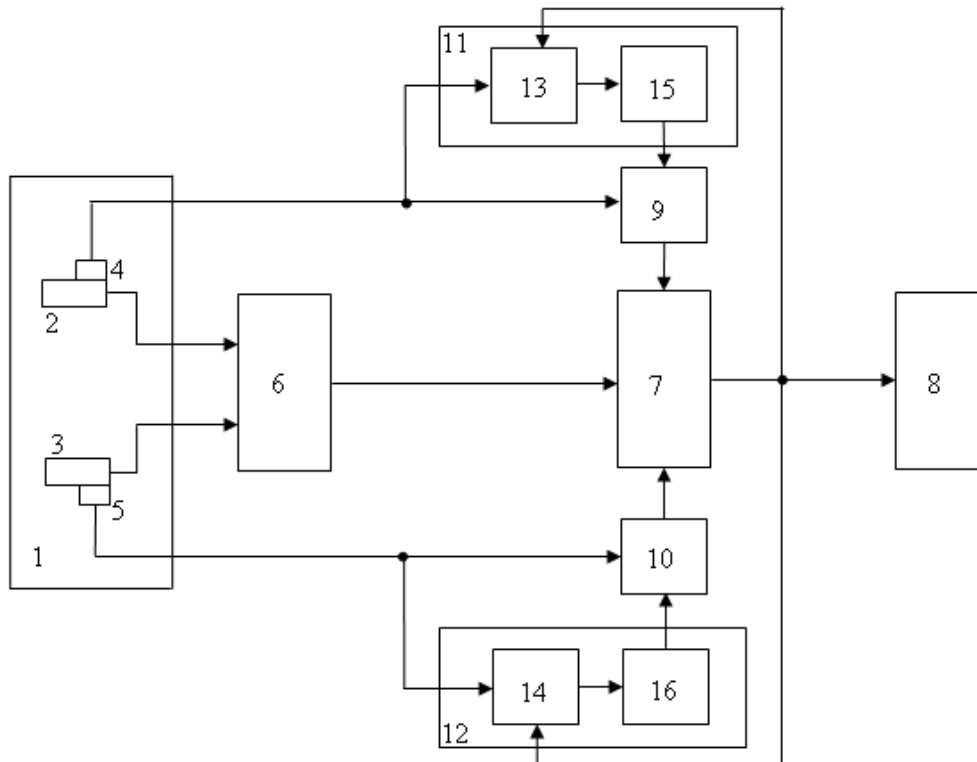


Рисунок 5.13 - Схема приемного устройства с компенсацией «шума движения»

Устройство работает следующим образом. Выходное напряжение электродного датчика усиливается малошумящим предварительным усилителем 6. Усиленное напряжение, представляющее собой смесь полезного сигнала с шумом, поступает на один из входов блока вычитания, а с его выхода - на приемный блок, где происходит выделение полезного сигнала и измерение его величины. На другие два входа блока вычитания подаются компенсирующие напряжения, которые формируются в двух одинаковых каналах компенсации.

Рассмотрим работу одного из каналов компенсации. Напряжение с датчика пульсаций скорости 4, установленного на электроде 2, усиливается регулируемым усилителем 9. При таком расположении датчика 4 его выходное напряжение пропорционально пульсациям скорости жидкости относительно электрода 2. Напряжения  $U(t)$  с выхода блока вычитания 7 и  $S(t)$  с датчика пульсаций скорости 4 поступают входы коррелометра 11. Коррелометр формирует медленно ме-

няющееся напряжение, пропорциональное значению функции взаимной корреляции  $B_{us}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T U(t)S(t-\tau)dt$  поступающих на него напряжений  $U(t)$  - с выхода блока вычитания 7 и  $S(t)$  - с выхода датчика скорости 4 при времени задержки  $\tau = 0$ . Как показал наш эксперимент, при введении инерционного  $RC$  звена с правильно подобранной постоянной времени в канал датчика скорости временной сдвиг между напряжениями  $U(t)$  и  $S(t)$  отсутствует. Длительность реализации  $T$  определяется постоянной времени интегратора.

Коррелометр 11 работает следующим образом. Напряжения  $U(t)$  и  $S(t)$  перемножаются в перемножителе 13. Пусть оба эти напряжения имеют синусоидальную форму:  $U(t) = U_m \sin \omega t$ ,  $S(t) = S_m \sin \omega t$ . Тогда выходное напряжение перемножителя  $U(t)S(t) = 0,5U_m S_m (1 - \cos 2\omega t)$  содержит две составляющие: постоянная составляющая  $0,5U_m S_m$  и переменная составляющая с частотой  $2\omega$ . В интеграторе 15, который представляет собой фильтр нижних частот с большой постоянной времени  $T$ , переменная составляющая усредняется. Время усреднения  $T$  должно на порядок и более превышать период принимаемого сигнала. Однако при слишком большом времени усреднения приемное устройство не успевает следить за изменением амплитуды пульсаций скорости. Для частот принимаемого сигнала в несколько десятков герц время усреднения может составлять  $0,8 \dots 1$  с. Постоянная составляющая, пропорциональная амплитуде пульсации скорости, дает на выходе интегратора медленно увеличивающееся напряжение. Составляющая выходного напряжения перемножителя, обусловленная некоррелированным с пульсацией скорости напряжением шума и сигнала, имеет вид переменного случайного напряжения с нулевым средним, поэтому она также усредняется в интеграторе. Таким образом, на выходе интегратора 15 имеется медленно меняющееся постоянное напряжение, величина которого определяется величиной составляющей от пульсации скорости в напряжении  $U(t)$ .

В исходном состоянии коэффициент усиления усилителя 9 минимален. Выходное напряжение интегратора 15 подается на управляющий вход регулируемо-

го усилителя 9 и увеличивает его коэффициент усиления до такого значения, при котором компенсирующее напряжение на выходе усилителя 9 становится равным по величине составляющей выходного напряжения предварительного усилителя 6, обусловленной пульсацией скорости жидкости у поверхности электрода 2. При этом блок вычитания 7 осуществляет полное вычитание этих напряжений, и его выходное напряжение не содержит составляющей, обусловленной пульсациями скорости у поверхности электрода 2, то есть  $U(t) = 0$ . Напряжение на выходе интегратора 15 перестает изменяться и устанавливается постоянным. Соответственно постоянным устанавливается и коэффициент усиления усилителя 9. Если пульсации скорости уменьшаются, то на выходе блока вычитания 7 вследствие перекомпенсации появляется напряжение  $U(t)$ , противофазное напряжению  $S(t)$ . В этом случае постоянная составляющая выходного напряжения перемножителя меняет знак. Напряжение на выходе интегратора начинает медленно уменьшаться, пока не будет достигнута полная компенсация составляющей шума датчика электромагнитного поля, соответствующей пульсации скорости. Таким образом, приемное устройство само подстраивается под величину пульсаций скорости. Аналогично происходит и компенсация напряжения, пропорционального пульсации скорости у поверхности второго электрода 3. Для этого используются второй коррелометр 12 и второй регулируемый усилитель 10. Для получения лучшей компенсации спектр выходного напряжения датчика скорости должен быть согласован со спектром электродного шума, что достигается применением частотных фильтров в усилителе 6 и каналах датчиков скорости 4,5.

Вектор пульсации скорости жидкости может быть случайным образом ориентирован относительно электрода, при этом пульсации электродного потенциала возникают под действием компонент пульсации скорости, направленных вдоль поверхности электрода. Поэтому в качестве датчиков пульсации скорости 4 и 5 следует использовать такие, которые реагируют на две компоненты скорости, как, например, наш датчик [93], описанный в разделе 4.6, или известный из литературы [107] (Дыкман). Если электродный датчик движется в неподвижной жид-

кости, то в качестве датчика пульсаций скорости можно использовать акселерометр с подключенным к его выходу интегратором.

Основываясь на результатах лабораторного эксперимента можно ожидать увеличения чувствительности приема низкочастотного электромагнитного поля в море буксируемым за кораблем электродным датчиком более чем в два раза в реальных условиях эксплуатации. Компенсация невозможна для той части шума движения, которая обусловлена некоррелированными флуктуациями потенциала разных участков поверхности электрода вследствие процессов адсорбции-десорбции ионов кислорода и хлора, а также активностью локальных гальванических элементов на поверхности электрода, образованных включениями других металлов, т. е. для той составляющей шума электродного датчика, которую мы называем фоновым шумом. Эти процессы активизируются при движении жидкости, но не связаны непосредственно с пульсациями скорости.

### ***5.3. Компенсация индустриальной помехи при приеме низкочастотных радиосигналов на движущемся подводном объекте***

Для радиосвязи с подводным объектом используют радиоволны сверхнизкочастотного диапазона, которые способны проникать в морскую воду на глубину до сотен метров, однако испытывая при этом значительное затухание. Электромагнитная волна распространяется из атмосферы вглубь моря таким образом, что ее плоский фронт параллелен поверхности воды. Часто в качестве антенны подводного движущегося объекта применяют кабельный электродный датчик (кабельную антенну). Он выполнен в виде двух металлических электродов, установленных на буксируемом за подводным аппаратом гибком кабеле, которые с помощью проводов кабеля соединены с приемником, установленном на борту подводного объекта [7] (Бернстайн). При буксировке кабельная антенна практически параллельна водной поверхности. В сверхнизкочастотном диапазоне длина волны в атмосфере составляет несколько тысяч километров, поэтому ко всем точкам кабельной антенны волна приходит с одинаковой фазой и амплитудой. Напряжение

сигнала, принимаемого датчиком,  $U_c = E_c l$  пропорционально расстоянию между электродами  $l$ , т.е. длине активной части кабельной антенны, и напряженности электрического поля  $E_c$ . Для достижения требуемой чувствительности расстояние между электродами составляет 200...300 метров. Электроустановки, расположенные на борту подводного объекта, создают переменные магнитные поля, возбуждающие в морской воде переменное электрическое поле индустриальной помехи. Спектр частот индустриальной помехи перекрывается со спектром принимаемого сигнала, поэтому для уменьшения индустриальной помехи до приемлемого уровня активную часть кабельной антенны относят от подводного объекта так, чтобы ближний электрод находился от него на расстоянии 200...300 метров. При этом общая длина кабельной антенны достигает 600 метров. Большие габариты антенны являются недостатком, создающим проблемы при ее эксплуатации.

В общем случае источник индустриальной помехи, в качестве которого обычно выступает силовое электрооборудование, создает негармоническое переменное магнитное поле, одна из гармоник которого близка по частоте к принимаемому сигналу, поэтому не может быть отфильтрована в приемнике частотным фильтром. Источник индустриальной помехи на подводном объекте можно представить в виде рамки с переменным током. Возбуждаемая рамкой электромагнитная волна, распространяясь вдоль кабельной антенны, испытывает в морской воде сильное затухание. Поэтому напряженность электрического поля индустриальной помехи уменьшается по мере удаления от подводного объекта. Принимаемая же электромагнитная волна (полезный сигнал) распространяется из атмосферы вглубь моря, таким образом, величина напряженности электрического поля полезного сигнала и фаза одинаковы во всех точках антенны. Это дает возможность осуществить компенсацию индустриальной помехи. Покажем осуществимость такой компенсации. Для получения компенсационного напряжения на пассивной части кабельной антенны, то есть ближе к подводному объекту, установим еще два электрода, образующие второй, компенсационный, электродный датчик. Расстояние между электродами второго датчика может быть на порядок меньше, чем

у первого, так как напряженность электрического поля индустриальной помехи здесь достаточно велика. Следовательно, и напряжение сигнала на втором датчике тоже на порядок меньше, чем на первом. После фазирования и уравнивания амплитуд компенсационное напряжение вычтем из напряжения, поступающего на приемный блок с первого датчика. Потери полезного сигнала при этом не превышают 10%. Зато длину пассивной части кабельной антенны можно уменьшить с 200...300 метров до 100 м и менее.

Представим источник индустриальной помехи в виде рамки площадью  $S$  с переменным током амплитудой  $I_m$  и круговой частотой  $\omega$ . В направлении максимума диаграммы направленности комплексная амплитуда напряженности электрического поля на расстоянии  $r$  от центра рамки [108] (Неганов)

$$\dot{E}_m = -\frac{i\omega\mu_0 I_m S}{4\pi} \left( \frac{e^{-ikr}}{r^2} + \frac{ike^{-ikr}}{r} \right), \quad (5.12)$$

где  $i$  – мнимая единица,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная.  $k$  – волновое число в морской воде. Волновое число в проводящей среде является комплексной величиной  $k = k' - ik''$ , где  $k' \approx k'' = \frac{1}{\Delta}$ . Здесь  $\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}}$  – толщина скин-слоя.

При проводимости воды в океане  $\sigma = 4 \text{ См/м}$  и частоте  $f = 76 \text{ Гц}$  (такую частоту использовали в проектах «Sanguine» и «Seafarer» ВМФ США) толщина скин-слоя составляет 29 м. Теперь выражение (5.12) можно переписать в виде

$$\dot{E}_m = -\frac{i\omega\mu_0 I_m S}{4\pi\Delta r} e^{-\frac{r}{\Delta}} \left( 1 - i \left( 1 + \frac{\Delta}{r} \right) \right) e^{-\frac{ir}{\Delta}} = \frac{i\omega\mu_0 I_m S}{4\pi} e^{-\frac{r}{\Delta}} \sqrt{1 + \left( 1 + \frac{\Delta}{r} \right)^2} e^{-i \left( \frac{r}{\Delta} + \arctg \left( 1 + \frac{\Delta}{r} \right) \right)} \quad (5.13)$$

С ошибкой, не превышающей 0,5%, в диапазоне  $r$  от 75 до 400 метров точные выражения можно аппроксимировать более простыми приближенными.

$$\sqrt{1 + \left( 1 + \frac{\Delta}{r} \right)^2} \approx 1,4 + 0,8 \frac{\Delta}{r} \quad (5.14)$$

$$\arctg \left( 1 + \frac{\Delta}{r} \right) \approx 0,79 + 0,4 \frac{\Delta}{r} \quad (5.15)$$



В результате для комплексной амплитуды электрического поля индустриальной помехи получаем более простое выражение.

$$\dot{E}_m = \frac{\omega\mu_0 I_m S}{4\pi r \Delta} e^{-\frac{r}{\Delta}} (1,4 + 0,8 \frac{\Delta}{r}) e^{-i(\frac{r}{\Delta} + 0,4 \frac{\Delta}{r} + 0,79)} . \quad (5.16)$$

Переходя от комплексной амплитуды к функции времени, получим

$$E(r, t) = \frac{\omega\mu_0 I_m S}{4\pi r \Delta} e^{-\frac{r}{\Delta}} (1,4 + 0,8 \frac{\Delta}{r}) \cos(\omega t - (\frac{r}{\Delta} + 0,4 \frac{\Delta}{r} + 0,79)) . \quad (5.17)$$

Таким образом, напряженность электрического поля индустриальной помехи с увеличением расстояния  $r$  уменьшается и приобретает фазовый сдвиг. Чтобы разделить функции времени и расстояния, косинус в выражении (5.17) удобно представить в виде

$$\begin{aligned} \cos(\omega t - (\frac{r}{\Delta} + 0,4 \frac{\Delta}{r} + 0,79)) &= \\ &= \cos(\frac{r}{\Delta} + 0,4 \frac{\Delta}{r} + 0,79) \cos \omega t + \sin(\frac{r}{\Delta} + 0,4 \frac{\Delta}{r} + 0,79) \sin \omega t . \end{aligned} \quad (5.18)$$

Напряжение индустриальной помехи между электродами кабельной антенны, находящимися на расстояниях  $r_1$  и  $r_2$  от центра рамки с током, определяется интегралом

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E(r, t) dr . \quad (5.19)$$

С учетом (5.17-5.19) получим:

$$\begin{aligned} U &= \frac{\omega\mu_0 I_m S}{4\pi} \left( \left( \frac{1,4}{\Delta} \int_{r_1}^{r_2} \frac{e^{-\frac{r}{\Delta}}}{r} \cos(\frac{r}{\Delta} + 0,4 \frac{\Delta}{r} + 0,79) dr + \right. \right. \\ &+ 0,8 \int_{r_1}^{r_2} \frac{e^{-\frac{r}{\Delta}}}{r^2} \cos(\frac{r}{\Delta} + 0,4 \frac{\Delta}{r} + 0,79) dr \Big) \cos \omega t + \left( \frac{1,4}{\Delta} \int_{r_1}^{r_2} \frac{e^{-\frac{r}{\Delta}}}{r} \sin(\frac{r}{\Delta} + 0,4 \frac{\Delta}{r} + 0,79) dr + \right. \\ &\left. \left. + 0,8 \int_{r_1}^{r_2} \frac{e^{-\frac{r}{\Delta}}}{r^2} \sin(\frac{r}{\Delta} + 0,4 \frac{\Delta}{r} + 0,79) dr \right) \sin \omega t \right) . \end{aligned} \quad (5.20)$$

Вычислим напряжение индустриальной помехи на компенсационном датчике. Пусть значения  $r_1$  и  $r_2$  составляют соответственно 90 м и 100 м.

$$U_1 = \frac{\omega\mu_0 I_m S}{4\pi} \cdot 10^{-5} (-11,6 \cos \omega t - 19,5 \sin \omega t) \approx -22,7 \cdot 10^{-5} \frac{\omega\mu_0 I_m S}{4\pi} \sin(\omega t + 0,54) \quad (5.21)$$

Напряжение индустриальной помехи на активной части кабельной антенны, электроды которой расположены на расстояниях  $r_1 = 100$  м и  $r_2 = 400$  м,

$$U_2 = \frac{\omega\mu_0 I_m S}{4\pi} \cdot 10^{-5} (9,4 \cos \omega t - 30,3 \sin \omega t) \approx -31,8 \cdot 10^{-5} \frac{\omega\mu_0 I_m S}{4\pi} \sin(\omega t - 0,3) \quad (5.22)$$

В соответствии с (5.21) и (5.22) напряжение на компенсационном датчике представляет собой гармоническое колебание по амплитуде в 1,4 раза меньшее, а по фазе опережающее на 0,84 радиана напряжение помехи на активной части кабельной антенны. Это означает возможность компенсации (вычитания) индустриальной помехи при уравнивании амплитуд и фаз, причем можно использовать только три электрода, электроды 3 и 4 можно объединить. То есть электрод на отметке 100 м можно использовать как для приема сигнала, так и для получения компенсирующего напряжения. Общая длина кабельной антенны при этом составляет 400 м против 600 м без компенсации.

Оценим уменьшение полезного сигнала после компенсации помехи. Напряжение полезного сигнала, снимаемое с активной части кабельной антенны длиной  $l_1$ , запишем в виде:

$$U_{c1} = E_c l_1 = U_m \sin \omega t. \quad (5.23)$$

Напряжение сигнала, поступающее для вычитания с компенсационного датчика, с учетом его длины  $l_2 = 0,1l_1$  и уравнивания амплитуд и фаз помехи

$$U_{c2} = E_c l_2 = 0,14 U_m \sin(\omega t - 0,84). \quad (5.24)$$

После вычитания получаем

$$U_{c1} - U_{c2} = 0,912 U_m (\sin \omega t + 0,115). \quad (5.25)$$

Следовательно, уменьшение напряжения принимаемого сигнала составляет менее 9 процентов.

Автором предложено приемное устройство для радиосвязи с подводным объектом, реализующее компенсацию индустриальной помехи, признанное изобретением [104,105]. Оно изображено на рисунке 5.14 и содержит четырехжильный

гибкий кабель 1, первый и второй электроды 2 и 3, образующие первый датчик электрического поля (активную часть кабельной антенны), третий и четвертый электроды 4 и 5, образующие второй (компенсационный) датчик электрического поля, предварительный усилитель 6, первый узкополосный фильтр 7, второй узкополосный фильтр 8, управляемый усилитель 9, управляемый фазовращатель 10, блок вычитания 11, приемный блок 12 и блок экстремального регулирования 13. Устройство работает следующим образом. Напряжение, снимаемое с электродов 2 и 3, усиливается предварительным усилителем 6 и через второй узкополосный частотный фильтр 8 поступает на первый вход блока вычитания 11. Фильтр 8 пропускает узкую полосу частот в окрестностях несущей частоты принимаемого сигнала (в нашем случае это частота 76 Гц). Напряжение, снимаемое с электродов 4 и 5, через последовательно включенные первый узкополосный частотный фильтр 7, управляемый усилитель 9 и управляемый фазовращатель 10, поступает на второй вход блока вычитания 11. Первый и второй узкополосные фильтры идентичны, их полоса пропускания согласована со спектром принимаемого сигнала. Применение узкополосных фильтров позволяет гармонизировать помеху, то есть превратить ее в напряжение с фиксированной частотой, что дает возможность осуществить компенсацию. В частности, дает возможность осуществить фазирование помехи, поступающей на вычитание от активной части кабельной антенны и компенсационного датчика, т.к. поворот фазы в управляемом фазовращателе 10 обычно зависит от частоты. С выхода блока вычитания 11 напряжение поступает на приемный блок 12 и на вход блока экстремального регулирования 13, первый и второй выходы которого соединены соответственно с управляющими входами управляемого усилителя 9 и управляемого фазовращателя 10. Блок экстремального регулирования вырабатывает напряжения, управляющие коэффициентом усиления управляемого усилителя 9 и поворотом фазы управляемого фазовращателя 10 до достижения минимального значения напряжения на выходе блока вычитания 11. На его выходе остается напряжение сигнала с помехами естественного происхождения и промышленные помехи, скомпенсировать кото-

рые не удается. Приемный блок 12 осуществляет дополнительное усиление, частотную фильтрацию принимаемого сигнала и выделение полезной информации.

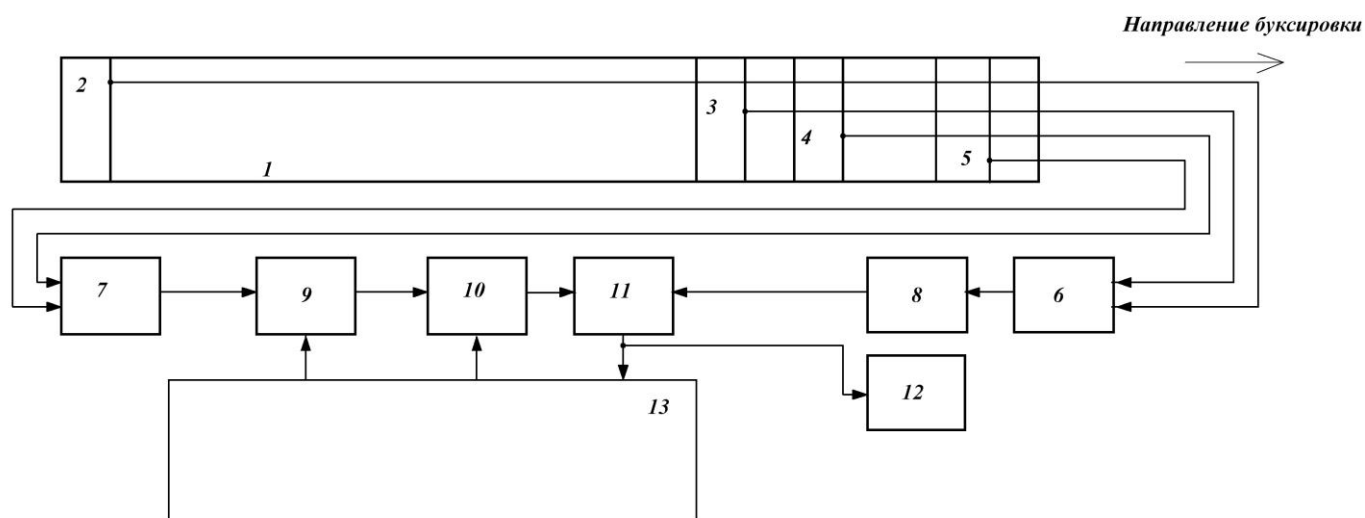


Рисунок 5.14 - Приемное устройство для радиосвязи с подводным объектом

Вследствие компенсации индустриальной помехи нет необходимости удалять активную часть антенны на сотни метров от подводного объекта. Это дает возможность уменьшить общую длину кабельной антенны с 600 до 400 метров, что существенно улучшает ее эксплуатационные характеристики.

#### 5.4. Краткие выводы

В главе 5 исследована возможность повышения чувствительности приемного устройства как за счет применения специально разработанных электродных датчиков, так и путем применения специальных схемных решений приемного устройства. Предложены конструкции датчиков, в которых электроды защищены от воздействия потока жидкости при установке их в длинные гидроканалы или при применении перегородок из пористого диэлектрика. Также предложены конструкции кабельного электродного датчика, в котором электроды защищены обтекателями от воздействия потока жидкости и механических повреждений.

Предложена схема приемного устройства с компенсацией шума движения, которая использует в качестве компенсирующего напряжения выходное напряжение датчиков скорости, установленных непосредственно на электродах датчика. Как показал лабораторный эксперимент, за счет использования высокой корреляции шума движения и пульсаций скорости жидкости возможно повышение чувствительности приемника в несколько раз. Также предложена схема приемного устройства, которое предназначено для применения при радиосвязи с подводным объектом, буксирующим кабельный электродный датчик. Разница в условиях распространения принимаемой электромагнитной волны и индустриальной помехи, создаваемой электроустановками объекта, с которым осуществляется связь, дает возможность с помощью специально установленного на кабель датчика получить компенсирующее напряжение, вычитание которого из напряжения основного датчика почти не уменьшает величину принимаемого сигнала. Это дает возможность повысить чувствительность приемника или уменьшить длину кабельного датчика.

## **Глава 6. Шум и предельная чувствительность безэлектродных датчиков электромагнитного поля [109 -116]**

### ***6.1. Оптимизация магнитоиндукционного датчика***

Магнитоиндукционный датчик представляет собой катушку с незамкнутым сердечником из ферромагнитного материала. Он реагирует на магнитную компоненту электромагнитного поля. Одним из главных требований, предъявляемых к датчику, является обеспечение максимального отношения сигнал – шум. Как отмечалось в главе 1, магнитоиндукционный датчик чувствителен к вибрации в магнитном поле Земли, причем при приеме электромагнитных полей в диапазоне сверхнизких частот спектр вибрационного шума перекрывается со спектром полезного сигнала. По этой причине магнитоиндукционный датчик в низкочастотном диапазоне не нашел применения на движущихся объектах, однако применяется в стационарных условиях. Пусть датчик неподвижен и вибрационный шум отсутствует. Тогда на низких частотах, где потерями в магнитном сердечнике можно пренебречь и единственным источником шума является активное сопротивление катушки [70,117] (Кузнецов, Колачевский), максимум отношения сигнал - шум может быть достигнут выбором оптимальных соотношений размеров элементов датчика. Как показали наши эксперименты, увеличение активного сопротивления катушки за счет влияния окружающей датчик морской воды не превышает единиц процентов, если датчик помещен в герметичный диэлектрический корпус, диаметр которого более чем в два раза превышает диаметр сердечника. Известны работы, посвященные оптимизации магнитоиндукционного датчика [18-20,27] (Гонтар, Дуб, Lukoschus). Предлагаемая в них оптимизация либо относится к рамкам без сердечника [19,20] (Дуб), либо относится к более высокочастотному диапазону, чем рассматриваемый [27] (Lukoschus), либо является неполной, поскольку оптимизирует лишь один конструктивный параметр - толщину цилиндрической катушки датчика при заданной ее массе [18]( Гонтар).

Определим оптимальную формы катушки датчика, обеспечивающую максимальное отношение ЭДС принимаемого сигнала к среднеквадратическому напряжению теплового шума при заданной величине ЭДС сигнала. Будем считать, что в рассматриваемом диапазоне частот активное сопротивление катушки мало отличается от сопротивления ее постоянному току  $R_K$ . Пусть датчик имеет цилиндрический сердечник длиной  $l_C$  и диаметром  $d_C$ . Определим оптимальные размеры катушки датчика, если она однослойная. При воздействии гармонического магнитного поля  $H = H_m \cos \omega t$  в одном слое намотки катушки индуцируется ЭДС сигнала с амплитудой

$$e_{m1} = \mu_0 \omega H_m S_B W_1 (1 + \mu_h S_C / S_B), \quad (6.1)$$

где  $S_B = \pi d_B^2 / 4$  - площадь витка ( $d_B$  - диаметр витка);  $S_C = \pi d_C^2 / 4$  - площадь сечения сердечника;  $\mu_h = \mu_{h \max} (1 - 0,765x^2 - 0,255y^2)$  - средняя магнитная проницаемость сердечника ( $\mu_{h \max}$  - максимальная магнитная проницаемость сердечника,  $x = 2a/l_C$ ,  $y = l_K/l_C$ ,  $a$  - смещение середины катушки относительно середины сердечника,  $l_K$  - длина катушки),  $W_1$  - число витков в слое [59] (Калихман). В данном случае оптимизация сводится к определению оптимальной длины катушки. Пусть  $a = 0$ . Тогда амплитуда ЭДС сигнала и сопротивление постоянному току однослойной катушки определяются выражениями

$$\begin{aligned} e_{m1} &= Ay [t^2 + \mu_{h \max} (1 - 0,255y^2)], \\ R_K &= Byt, \end{aligned} \quad (6.2)$$

где  $A = \mu_0 \omega H_m S_C l_C k_H / d$ ;  $B = 4 \rho l_C k_H d_C / d^3$ ;  $t = d_B / d_C$ ;  $d$  - диаметр провода,  $\rho$  - удельное сопротивление материала провода,  $k_H$  - коэффициент неплотности намотки в слое [59] (Калихман). Максимум отношения сигнал - шум для однослойной катушки достигается при выполнении условия  $(e_{m1} / \sqrt{R_K})'_y = 0$ . В соответствии с (6.2)

$$y_{opt} = 0,8856 \sqrt{1 + t^2 / \mu_{h \max}}. \quad (6.3)$$

На практике обычно  $t \approx 1$ ,  $\mu_{h\max} \gg 1$ , откуда  $y_{opt} \approx 0,9$ . Однако легко показать, что при указанных условиях в области  $y = 0,55 \dots 1,0$  отношение сигнал - шум не более чем на 10 % отличается от максимального.

Для увеличения напряжения сигнала, снимаемого с датчика, его катушка должна иметь большое число витков и не может быть однослойной. Определим оптимальную форму катушки, при которой отношение сигнал-шум достигает максимального значения при заданной величине напряжения сигнала. Пусть катушка занимает всю длину сердечника и состоит из десяти секций длиной по  $0,1 l_c$  (рисунок 6.1). На основании (6.1) по аналогии с (6.2) для амплитуды ЭДС сигнала, индуцированного в  $j$ -м слое  $i$ -й секции можно записать

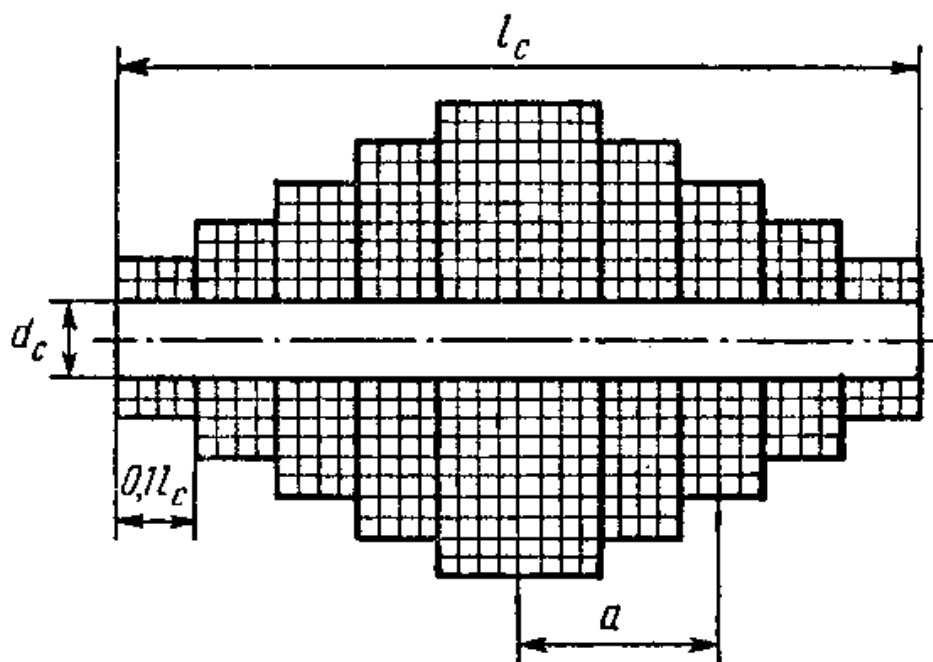


Рисунок 6.1 - Схема намотки катушки оптимизированного магнитоиндукционного датчика

$$e_{nji} = 0,1A [t_{ji}^2 + \mu_{h\max} (0,998 - 0,765x_i^2)], \quad (6.4)$$

Считаем, что

$$t_{ji}^2 \ll \mu_{h\max} (0,998 - 0,765x_i^2) \quad (6.5)$$

Это условие можно заменить более простым, ограничивающим максимальный диаметр катушки,



$$t_{\max}^2 \ll \mu_{h \max}. \quad (6.6)$$

В магнитоиндукционных датчиках сверхнизкочастотного диапазона радиоволн нашли применение сердечники из феррита с начальной магнитной проницаемостью  $\mu_H = 1500 \dots 2000$  и отношением  $l_c / d_c = 25 \dots 30$ , для которых согласно [59] (Калихман)  $\mu_{h \max} > 250$ . В этом случае условие (6.6) сводится к условию  $t_{\max} \leq 5$ . В дальнейшем считаем, что это условие выполняется. Присвоим номера секциям катушки от середины к ее краю от 1 до 5. Тогда ЭДС  $i$ -й секции  $E_{mi}$  равна

$$E_{mi} = e_{mi} N_i, \quad (6.7)$$

где  $N_i$  - число витков в  $i$ -й секции,  $e_{mi}$  - ЭДС сигнала, индуцируемого в одном слое  $i$ -й секции. Величина ЭДС катушки  $E_{mk}$  равна сумме ЭДС всех ее секций. Вследствие симметрии катушки

$$E_{mk} = 2 \sum_{i=1}^5 E_{mi} = 0,2 A \mu_{h \max} \sum_{i=1}^5 (0,998 - 0,765 x_i^2). \quad (6.8)$$

Обозначим  $A' = 0,2 \mu_{h \max} A$ . Величина  $A'$  равна удвоенному значению ЭДС одного слоя, расположенного в центре сердечника. Тогда

$$E_{mk} = A' (0,99 N_1 + 0,93 N_2 + 0,81 N_3 + 0,62 N_4 + 0,38 N_5). \quad (6.9)$$

Сопротивление  $i$ -й секции постоянному току

$$R_i = \frac{0,4 l_c k_H \rho}{d^3} N_i \left( d_c + \frac{d N_i}{k_3} \right), \quad (6.10)$$

где  $k_H$  - коэффициент неплотности намотки;  $k_3 = d / (d + \Delta)$  - коэффициент заполнения,  $\Delta$  - толщина межслойной изоляции. Сопротивление катушки

$$R_k = \frac{0,8 \rho l_c k_H}{d^3} \sum_{i=1}^5 N_i \left( d_c + \frac{d N_i}{k_3} \right) = \frac{0,8 \rho l_c k_H}{d^3} \times \left[ d_c (N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5) + \frac{d}{k_3} (N_1^2 + N_2^2 + N_3^2 + N_4^2 + N_5^2) \right]. \quad (6.11)$$

Поставим условие минимума сопротивления  $R_k$  при заданной величине ЭДС  $E_{mk}$  и найдем распределение  $N_1 \dots N_5$ , удовлетворяющее этому условию. Из (6.9) определим  $N_1$  и подставим полученное значение в (6.11). Затем найдем частные производные полученного выражения по оставшимся переменным  $N_2, N_3, N_4, N_5$  и приравняем их к нулю. Решением полученной таким образом системы алгебраических уравнений является:

$$\begin{aligned} N_1 &= 0,330E_{mk} / A' + 0,120d_c k_3 / d, \\ N_2 &= 0,319E_{mk} / A' + 0,061d_c k_3 / d, \\ N_3 &= 0,269E_{mk} / A' - 0,001d_c k_3 / d, \\ N_4 &= 0,171E_{mk} / A' - 0,115d_c k_3 / d, \\ N_5 &= 0,125E_{mk} / A' - 0,268d_c k_3 / d. \end{aligned} \quad (6.12)$$

Выражения (6.12) являются решением задачи оптимизации. Из них видно, что диаметр катушки уменьшается к ее краям. При  $t_{\max} = 5$  получаем  $N_{1\max} = 2k_3 d_c / d$ , откуда следует, что вес второго слагаемого в выражении для  $N_1$  составляет не менее 6 %. Исходя из этого, а также из уменьшения коэффициента при первом слагаемом в (6.12), легко видеть, что выполнение условия (6.6) ведет к выполнению и условия (6.5). Из (6.12) следует, что положительное значение числа слоев в любой секции достигается при

$$E_{mk} / (A' d_c k_3) > 2,144. \quad (6.13)$$

С другой стороны, условие  $N_{1\max} = 2k_3 d_c / d$  означает, что

$$E_{mk} / (A' d_c k_3) \leq 5,7. \quad (6.14)$$

Выражения (6.13) и (6.14) указывают границы применимости (6.12) для расчета числа слоев в секциях катушки.

Определим выигрыш по активному сопротивлению оптимизированного датчика по сравнению с неоптимизированным, имеющим цилиндрическую катушку диаметром  $d_k$  и длиной  $l_k$ , расположенную симметрично относительно середины сердечника. Число слоев неоптимизированной катушки

$$N = \frac{d_k - d_c}{2d} k_3 = \frac{d_c k_3}{2d} (t_{\max} - 1), \quad (6.15)$$

где  $t_{\max} = d_K / d_C$ . Сопротивление неоптимизированной катушки в соответствии с (6.10), полагая длину секции равной  $l_K$ , с учетом (6.15)

$$R_K = \frac{\rho l_C d_C^2 k_H k_3}{d^4} y(t^2 - 1). \quad (6.16)$$

ЭДС сигнала одного слоя намотки катушки неоптимизированного датчика

$$e_m \approx 5A'y(1 - 0,255y^2). \quad (6.17)$$

Подставив в (6.11) значения  $N_1 \dots N_5$  из (6.12), а также значение  $A'$  из (6.17), получим сопротивление катушки оптимизированного датчика

$$R_{K_{\text{опт}}} = \frac{0,8\rho l_C k_3}{d^2} \left( \frac{8,25E_{mK}^2 y^2 (1 - 0,255y^2)}{e_m^2 k_H} + 6,15 \frac{E_{mK} d_C y (1 - 0,255y^2)}{e_m d} - 0,1 \frac{d_C^2 k_H}{d^2} \right). \quad (6.18)$$

Пусть величина ЭДС сигнала у оптимизированного и неоптимизированного датчика одинакова. Тогда  $E_{mK} / e_m = N$ . С учетом (6.15)

$$R_{K_{\text{опт}}} = \frac{0,8\rho l_C k_H k_3 d_C^2}{d^4} [2,06(t-1)^2 y^2 (1 - 0,255y^2) + 3,07 y (1 - 0,255y^2) - 0,1]. \quad (6.19)$$

Найдем отношение  $R_K / R_{K_{\text{опт}}}$ , определяющее выигрыш по активному сопротивлению оптимизированного датчика по сравнению с неоптимизированным.

$$\frac{R_K}{R_{K_{\text{опт}}}} = \frac{1,25y(t^2 - 1)}{2,06(t-1)^2 y^2 (1 - 0,255y^2) + 3,07(t-1)y(1 - 0,255y^2) - 0,1}. \quad (6.20)$$

Прежде, чем по формуле (6.20) определить отношение  $R_K / R_{K_{\text{опт}}}$ , выясним, в каких пределах может находиться  $t$ . Для оптимизированного и неоптимизированного датчика значение  $t_{\max} \leq 5$ . Также у оптимизированного датчика число витков в крайних секциях положительно, если  $t_{\max} \geq 2,66$ . Максимальное число слоев в центральных секциях катушки оптимизированного датчика

$$N_{1\max} = 0,33 \frac{E_{mK}}{A'} + 0,12 \frac{d_C k_3}{d}. \quad (6.21)$$

С учетом (6.17)

$$N_{1\max} = 1,65Ny + 0,12 \frac{d_c k_3}{d}. \quad (6.22)$$

Здесь  $N$  - число слоев неоптимизированной катушки. В соответствии с (6.15)

$$N_{1\max} = \frac{d_c k_3}{d} [0,825(t_{\max} - 1)y + 0,12]. \quad (6.23)$$

Теперь для оптимизированной катушки в соответствии с (6.15)

$$t_{\max \text{ opt}} = 1 + \frac{2d}{d_c k_3} N_{1\max} = 1,24 + 1,65(t_{\max} - 1)y. \quad (6.24)$$

Это выражение устанавливает связь между диаметром катушки оптимизированного и неоптимизированного датчика при условии, что они имеют одинаковый сердечник и одинаковое значение ЭДС сигнала. Из него, в частности, следует, что при  $y > 0,5$  неоптимизированная катушка тоньше оптимизированной. Кривые, рассчитанные по формуле (6.20), при выполнении условия  $2,66 \leq t_{\text{opt}} \leq 5$  приведены на рисунке 6.2. Из кривых следует, что сопротивление оптимизированной катушки на 4...26 % меньше, чем у неоптимизированной.

Определим предельную чувствительность по магнитному полю неоптимизированного датчика. Для него ЭДС сигнала определяется выражением

$$E_{\text{mk}} = \frac{0,5H_m \omega \mu_0 \mu_{h\max} S_c l_c d_c k_3 k_H}{d^2} y(1 - 0,255y^2)(t - 1). \quad (6.25)$$

Предельная чувствительность датчика определяется тепловым шумом катушки, то есть  $E_{\text{mk}}^2 = 8kT\Delta f R_k$ , где  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура,  $\Delta f$  - полоса пропускания приемника. Из (6.25) и (6.16) получим

$$H_m = \frac{4}{\mu_0 \mu_{h\max} S_c \omega (1 - 0,255y^2)} \sqrt{\frac{2\rho(t+1)kT\Delta f}{l_c k_3 k_H y(t-1)}}. \quad (6.26)$$

Здесь датчик задан размерами сердечника и его магнитной проницаемостью ( $l_c, S_c, \mu_{h\max}$ ), длиной и толщиной катушки ( $y, t$ ). В формулу (6.26) не вошло число витков и диаметр провода катушки, поскольку шумы усилительного каскада, к которому подключен датчик, не учитывались. На практике, исходя из собственного шума первого каскада приемника, определяется необходимая величина ЭДС

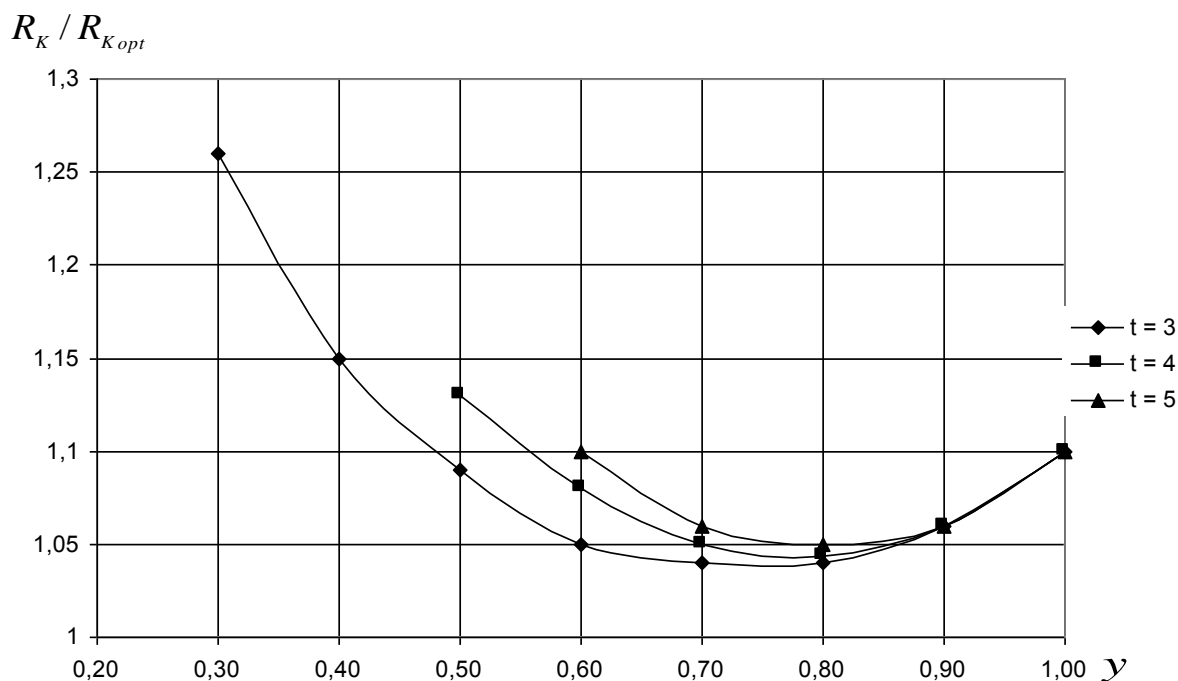


Рисунок 6.2 - Выигрыш по активному сопротивлению оптимизированного магнитоиндукционного датчика по сравнению с неоптимизированным в зависимости от длины и диаметра катушки неоптимизированного датчика. Здесь  $y$  – отношение длины катушки к длине сердечника,  $t$  – отношение диаметра центральной секции катушки к диаметру сердечника

сигнала датчика, а затем рассчитываются его конструктивные параметры. После этого можно определить чувствительность датчика по формуле (6.26). Предельная чувствительность оптимизированного магнитоиндукционного датчика выше в  $\sqrt{R_K / R_{K_{opt}}}$  раз, то есть в 1,02...1,13 раз в соответствии с рисунком 6.2. При невыполнении условия (6.13), в частности при однослойной катушке, целесообразно катушку делать цилиндрической с длиной 0,7...0,9 длины сердечника. При невыполнении условия (6.14) расчет числа слоев по (6.12) не обеспечивает оптимальности катушки. Однако в этом случае катушка будет иметь все же более низкое сопротивление, чем цилиндрическая.

Магнитоиндукционный датчик, оптимизированный в соответствии с результатами раздела 6.1, был использован при поиске подземного кабеля. С его помощью был обнаружен подземный оптоволоконный кабель в бронированной

оболочке по его переменному магнитному полю на нечетных гармониках промышленной частоты (измерения производились на частотах 350 и 550 Гц) и определены его координаты с точностью до 0,5 м. Глубина расположения кабеля составляла 3 - 4 метра. Оптимизированный магнитоиндукционный датчик был использован также для определения координат кабеля, проложенного по дну пресного озера на глубине 3 метра [118] (Каевицер). Датчик позволил уверенно регистрировать поле кабеля при силе тока, протекающего по кабелю, 8,5 мА и частоте 15 кГц. Также оптимизированный магнитоиндукционный датчик применялся при измерениях низкочастотного электромагнитного поля в водоемах Подмосковья [119].

### 6.2. Оптимизация трансформаторного датчика электромагнитного поля

Простейший трансформаторный датчик (рисунок 6.3), известный из литературы [13,14] (Гордиенко, Lenz), представляет катушку с кольцевым ферромагнитным сердечником. Сердечник имеет относительную магнитную проницаемость  $\mu$ , внутренний диаметр  $D_1$ , внешний диаметр  $D_2$  и высоту  $H$ , диаметр окна катушки –  $D_3$ . Покажем, что выбором оптимальных соотношений между конструктивными параметрами датчика можно достичь для него наибольшей величины

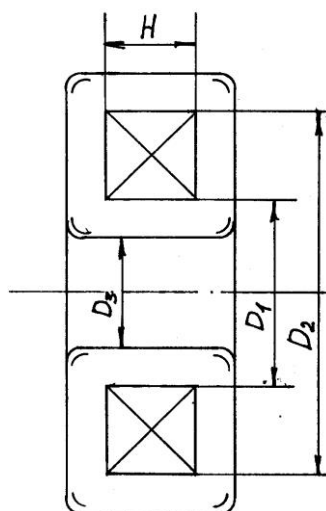


Рисунок 6.3 - Схема трансформаторного датчика

коэффициента преобразования при заданных габаритах. Это ведет к повышению чувствительности приемного устройства, если датчик расположен далеко от приемника и подключен к нему длинным кабелем, поскольку уменьшает влияние вибрационного шума кабеля и наводок на кабель от местных источников помех. При протекании сквозь окно катушки тока проводимости  $I$ , вызванного существующим в среде переменным электрическим полем с напряженностью  $E$  (вектор  $\vec{E}$  ориентирован вдоль оси сердечника), в сердечнике на расстоянии  $r$  от оси датчика возникает магнитная индукция

$$B \cong \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r} \quad (6.27)$$

и магнитный поток

$$\Phi = \int_{D_1/2}^{D_2/2} \frac{\mu\mu_0 IH}{2\pi r} dr = \frac{\mu\mu_0 IH}{2\pi} \ln \frac{D_2}{D_1}, \quad (6.28)$$

где  $\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума. Ток сквозь окно сердечника

$$I = \sigma E a \frac{\pi D_3^2}{4}, \quad (6.29)$$

где  $\sigma$  - удельная проводимость окружающей среды,  $a$  - коэффициент, учитывающий искажение внешнего электрического поля датчиком ( $a > 1$ ). Тогда выходное напряжение датчика при гармоническом характере электрического поля  $E = E_m \sin \omega t$

$$u = W \frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{8} W \omega \mu \mu_0 \sigma a H D_3^2 \left( \ln \frac{D_2}{D_1} \right) E_m \sin \omega t, \quad (6.30)$$

где  $W$  - число витков в обмотке датчика. Амплитуда выходного напряжения

$$U_m = \frac{1}{8} \omega \mu \mu_0 \sigma a E_m A, \quad (6.31)$$

где  $A$  - коэффициент, зависящий от конструктивных параметров датчика.

$$A = H W D_3^2 \ln \frac{D_2}{D_1}. \quad (6.32)$$

Максимум напряжения  $U_m$  достигается при максимальном значении  $A$ . Будем считать, что катушка датчика намотана виток к витку с прокладкой межслойной изоляции. Число витков в первом слое намотки

$$W_1 = \pi D_1 k_H / d, \quad (6.33)$$

где  $d$  - диаметр медной жилы провода,  $k_H$  - коэффициент, учитывающий неплотность намотки и толщину изоляции провода. Число витков в каждом последующем слое уменьшается на

$$\delta W = \frac{2\pi(d + \Delta)}{d} k_H = 2\pi \frac{k_H}{k_3}, \quad (6.34)$$

где  $\Delta$  - толщина межслойной изоляции, включая изоляцию провода,  $k_3 = d / (d + \Delta)$  - коэффициент заполнения. Число витков в  $i$ -м слое

$$W_i = W_1 - 2\pi \frac{k_H}{k_3} (i - 1), \quad (6.35)$$

а число витков всей катушки

$$W = n \left[ W_1 - \pi(n - 1) \frac{k_H}{k_3} \right], \quad (6.36)$$

где

$$n = \frac{D_1 - D_3}{2d} k_3 \quad (6.37)$$

– число слоев намотки. Полагая  $n \gg 1$ , получим

$$\begin{aligned} A &= HD_3^2 \frac{D_1 - D_3}{2d} k_3 \left[ \frac{\pi D_1 k_H}{d} - \frac{\pi k_H}{2d} (D_1 - D_3) \right] \ln \frac{D_2}{D_1} = \\ &= \frac{HD_3^2 (D_1^2 - D_3^2) \pi k_H k_3}{4d^2} \ln \frac{D_2}{D_1}. \end{aligned} \quad (6.38)$$

Это выражение достигает максимума при

$$D_3 = \frac{D_1}{\sqrt{2}}. \quad (6.39)$$

При этом амплитуда выходного напряжения датчика

$$U_m = \frac{E_m \pi \sigma \omega \mu_0 H k_H k_3}{128d^2} D_1^4 \ln \frac{D_2}{D_1}. \quad (6.40)$$



Выражение (6.40) при заданной величине  $D_2$  также максимально, если выполнено соотношение

$$\frac{D_2}{D_1} = \sqrt[4]{e}, \quad (6.41)$$

где  $e$  - основание натурального логарифма. В этом случае амплитуда выходного напряжения оптимизированного датчика максимальна

$$U_{m \text{ opt}} = \frac{\pi E_m \sigma a \omega \mu_0 H k_H k_3 D_2^4}{512 e d^2}. \quad (6.42)$$

Коэффициент преобразования датчика также достигает максимального значения

$$K = \frac{U_m}{E_m} = \frac{\pi \sigma a \omega \mu_0 H k_H k_3 D_2^4}{512 e d^2}. \quad (6.43)$$

Отсюда следует, что выгодно использовать сердечник максимально возможного диаметра и уменьшать диаметр провода. Уменьшение диаметра провода ведет к увеличению числа витков  $W$  обмотки, которое связано с диаметром провода  $d$  соотношением

$$W = \frac{\pi k_H k_3 (D_1^2 - D_3^2)}{4 d^2} = \frac{\pi k_H k_3 D_1^2}{8 d^2}. \quad (6.44)$$

Увеличение коэффициента преобразования датчика, достигнутое за счет его оптимизации, в соответствии с (6.31), (6.38) и (6.42) равно отношению  $U_{m \text{ opt}}/U_m$

$$\frac{U_{m \text{ opt}}}{U_m} = \left( \frac{D_2}{D_3} \right)^4 \frac{1}{16 \left( \frac{D_1^2}{D_3^2} - 1 \right) \ln \frac{D_2}{D_1}}. \quad (6.45)$$

Пусть, например,  $D_2/D_1 = 2$ ,  $D_1/D_3 = 2$ . Из (6.45) следует, что в этом случае коэффициент преобразования оптимизированного датчика при одинаковых значениях  $D_2$  и  $H$  в 2,8 раза больше, чем у неоптимизированного. При оптимизации по полученным формулам (6.39), (6.41), (6.44) габаритные размеры датчика составляют:

$$\begin{aligned} D_{\max} &\cong 1,23 D_2 \\ H_{\max} &\cong H + 0,23 D_2 \end{aligned} \quad (6.46)$$

Расчет датчика начинают с определения  $D_2$  и  $H$ , исходя из его максимальных габаритов, затем из (6.41) находят  $D_1$ , после чего определяют число витков  $W$  обмотки по формуле (6.44). При этом диаметр окна  $D_3$  должен получиться равным  $D_1 / \sqrt{2}$ . Реально диаметр окна будет несколько меньше, а габаритные размеры – несколько больше, чем (6.46), так как датчик должен быть герметизирован и заключен в магнитоэлектрический экран. При рядовой намотке и диаметре провода без изоляции 0,1...0,25 мм  $k_H$  можно принять равным 0,8. При послойной намотке без прокладки межслойной изоляции  $k_3$  имеет такое же значение. При намотке «внавал»  $k_3 = k_H \approx 0,7$ .

### 6.3. Предельная чувствительность трансформаторного датчика электромагнитного поля

Эквивалентная схема трансформаторного датчика на низких частотах показана на рисунке 6.4. Здесь  $r_1$  - сопротивление объемного витка, образованного окружающей датчик водой,  $r_2$  - активное сопротивление катушки,  $L_1$  - индуктивность объемного витка,  $W$  - число витков катушки,  $e_c$  - ЭДС сигнала,  $C$  - собственная емкость катушки. Параллельное соединение элементов эквивалентной схемы  $r_1 W^2$  и  $L_1 W^2$  на рабочей частоте  $\omega$  можно пересчитать в последовательное

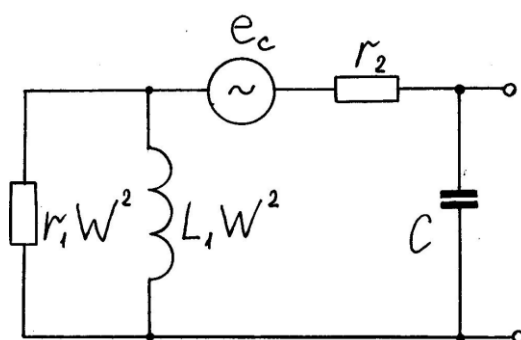


Рис. 6.4. Эквивалентная схема трансформаторного датчика на низких частотах.

соединение элементов  $L_1 W^2$  (заметим, что индуктивность катушки равна  $L_1 W^2$ ) и вносимого во вторичную цепь трансформатора сопротивления  $R_{\text{вн}}$

$$R_{\text{вн}} = W^2 \omega^2 L_1^2 / r_1. \quad (6.47)$$

Сопротивление  $r_1$  можно определить как сумму сопротивления трубы, образованной окном датчика, и сопротивления растекания от торцев трубы во внешнюю область пространства. В соответствии с [11,12] (Зимин, Кочанов)

$$r_1 \approx \frac{H + (D_1 - D_3)}{\pi \sigma (D_3/2)^2} + \frac{1}{2\sigma D_3} = \frac{1}{\pi \sigma D_3} \left( \frac{4H + 4D_1}{D_3} - 2,43 \right). \quad (6.48)$$

Индуктивность объемного витка [61] (Волгов)

$$L_1 = 2\mu H \ln \frac{D_2}{D_1} \cdot 10^{-7}. \quad (6.49)$$

При послойной рядовой намотке сопротивление катушки равно сумме сопротивлений слоев

$$r_2 = \sum_{i=1}^n W_i r_{B_i} \quad (6.50)$$

где  $r_{B_i}$  - сопротивление витка в  $i$ -м слое намотки,  $W_i$  - число витков в  $i$ -м слое намотки,  $n$  - число слоев. Сопротивление витка в первом слое

$$r_{B_1} \approx 4\rho \frac{D_2 - D_1 + 2H}{\pi d^2} = \frac{4\rho p}{\pi d^2}, \quad (6.51)$$

где  $p$  - периметр сечения сердечника,  $\rho$  - удельное сопротивление материала провода (для меди  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом м). Длина витка в каждом последующем слое увеличивается примерно на  $2\pi(d + \Delta)$ . Отсюда в  $i$ -м слое

$$r_{B_i} = r_{B_1} + \frac{8\rho i - 1}{d k_3}. \quad (6.52)$$

Сопротивление катушки постоянному току с учетом (6.33) и (6.35)

$$r_2 = n r_{B_1} W_1 + \left( \frac{8\rho W_1}{d k_3} - 2\pi r_{B_1} \frac{k_H}{k_3} \right) \frac{n-1}{k_3} n - \frac{8}{3} \frac{\pi \rho k_H}{d k_3^2} (2n-1)(n-1)n. \quad (6.53)$$

Здесь  $W_1$  - число витков в первом слое катушки,  $k_H$  - коэффициент неплотности катушки,  $k_3$  - коэффициент заполнения, учитывающий также и изоляцию провода.

Число слоев катушки катушки

$$n = (D_1 - D_3)k_3 / (2d), \quad (6.54)$$

где  $d$  - диаметр провода без изоляции. Из (6.44) диаметр провода

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi k_H k_3}{W} (D_1^2 - D_3^2)}. \quad (6.55)$$

При выполнении условия  $W_1 \gg 2\pi$  в соответствии с (6.53 - 6.55) сопротивление катушки датчика

$$r_2 \approx \frac{16p\rho W^2}{\pi^2 k_3 k_H} \frac{6D_1^2 + 3(B-1)(D_1 - D_3)D_1 - 2B(D_1 - D_3)^2}{D_1(D_1 - D_3)(D_1 + D_3)^2}, \quad (5.56)$$

где  $B = \pi D_1 / p$  - параметр, зависящий от геометрии сердечника,  $p = D_2 - D_1 + 2H$  - периметр сечения сердечника. При небольшом числе слоев катушки  $D_1 + D_3 \approx 2D_1$ . В соответствии с (6.56) сопротивление катушки датчика на постоянном токе

$$r_2 \approx \frac{8p\rho W^2}{\pi^2 k_H k_3 D_1 (D_1 - D_3)}. \quad (6.57)$$

Реальное активное сопротивление тороидальной катушки на переменном токе  $r_f = br_2$  в  $b > 1$  раз больше, чем на постоянном токе. Предельная чувствительность трансформаторного датчика определяется его тепловым шумом. ЭДС шума в полосе 1 Гц равна

$$e_{ш} = \sqrt{4kT(R_{вн} + r_f)} = \sqrt{4kTR_{вн}(1 + r_f / R_{вн})}. \quad (6.58)$$

Сравним сопротивления  $r_f$  и  $R_{вн}$ . Из (6.47 - 6.49), (6.57) для медного провода при  $k_H k_3 = 0,7$  получаем

$$\frac{R_{вн}}{r_f} \approx \frac{6,4 \cdot 10^{-6} \sigma \omega^2 \mu^2 H^2 D_1 D_3 (D_1 - D_3) \ln^2 \frac{D_2}{D_1}}{b(D_2 - D_1 + 2H) \left( \frac{4H + 4D_1}{D_3} - 2,43 \right)}. \quad (6.59)$$

Проведен эксперимент по измерению сопротивления потерь тороидальной катушки. На сердечник из феррита марки 3000НМ было намотано «внавал» 500 витков провода ПЭВ-2 диаметром 0,25 мм. Сопротивление катушки постоянному току составило 6,4 Ом. На переменном токе сопротивление потерь катушки с увеличением частоты возрастало, причем на частотах выше 150 Гц зависимость коэффициента  $b$  от частоты практически линейная. Если на частоте 100 Гц это возрастание составило около 20%, то на частоте 300 Гц сопротивление выросло в 2 раза. Измерения производились методом куметра с использованием высокодобротных конденсаторов К71-4 ( $\operatorname{tg} \delta \leq 0,0005$ ) при слабой связи контура с генератором. Напряжение на контуре не превышало 10 мВ, измерительный усилитель имел входное сопротивление 100 МОм.

Как видно из (6.59), даже с учетом частотной зависимости коэффициента  $b$  на частотах выше некоторой  $f_{\text{гр}}$  выбором размеров и материала сердечника можно добиться выполнения соотношения  $R_{\text{вн}} / br_2 \gg 1$ . Например, для датчика с сердечником из феррита 4000НМ и параметрами  $D_1 = 0,11 \text{ м}$ ,  $D_2 = 0,18 \text{ м}$ ,  $H = 0,08 \text{ м}$ ,  $D_3 = 0,1 \text{ м}$ ,  $\mu = 4000$  и массой около 7 кг  $f_{\text{гр}} \approx 70 \text{ Гц}$ . Поэтому при определении предельной чувствительности датчика в диапазоне частот  $f > f_{\text{гр}}$  можно пренебречь вкладом сопротивления катушки в тепловой шум датчика. ЭДС шума определяется только вносимым во вторичную цепь трансформатора сопротивлением. В полосе 1 Гц

$$e_{\text{ш}} \cong 2W\omega L_1 \sqrt{\frac{kT}{r_1}}, \quad (6.60)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура. ЭДС сигнала в соответствии с (6.30)

$$e_c = 0,125W\omega\mu_0\sigma aHD_3^2(\ln D_2 / D_1)E, \quad (6.61)$$

где  $a$  – коэффициент, учитывающий искажение внешнего электрического поля самим датчиком ( $a \geq 1$ ),  $E$  - напряженность электрического поля сигнала (действующее значение),  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная проницаемость вакуума.

Приравнивая (6.60) и (6.61), с учетом (6.48) и (6.49) найдем предельную чувствительность трансформаторного датчика в полосе 1 Гц.

$$E_{\text{пр}} = \frac{8}{\pi \sigma a D_3^2} \sqrt{\frac{kT}{r_1}} = \frac{4}{a D_3} \sqrt{\frac{kT}{\pi \sigma (H + D_1 - 0,61 D_3)}}. \quad (6.62)$$

Для сердечника с размерами, указанными выше, при  $T = 280\text{K}$ ,  $\sigma = 4\text{См/м}$ ,  $a = 1$ ,  $r_1 = 4,1\text{ Ом}$  получим  $E_{\text{пр}} = 1,95\text{ нВ/м}\sqrt{\text{Гц}}$ . Это значение более чем на порядок превышает аналогичное значение для электродного датчика с базой 1 метр и сферическими электродами радиусом 5 см, которая даже с учетом шумов предварительного усилителя и согласующего трансформатора составляет  $0,13 \dots 0,2\text{ нВ/м}\sqrt{\text{Гц}}$  (см. Таблицу 2.15). То есть в приведенном примере электродный датчик обеспечивает более высокую чувствительность, чем трансформаторный. Заметим, что чувствительность тем выше, чем меньше значение  $E_{\text{пр}}$ .

Определим число витков катушки датчика. Оно непосредственно не влияет на величину  $E_{\text{пр}}$ , однако от него зависит коэффициент шума предварительного усилителя, следовательно, и предельная чувствительность приемного устройства в целом. Добротность вторичной цепи датчика

$$Q \cong \frac{\omega W^2 L_1}{R_{\text{вн}}} = \frac{r_1}{\omega L_1} \gg 1, \quad (6.63)$$

поэтому она может быть настроена в резонанс на частоту сигнала путем подключения к выходу датчика конденсатора необходимой емкости. Напряжение сигнала на выходе датчика при этом в  $Q$  раз больше, чем  $e_c$ . Эквивалентное сопротивление резонансного контура

$$R_{oe} = W^2 r_1. \quad (6.64)$$

Для получения минимального значения коэффициента шума предварительного усилителя должно выполняться условие  $R_{oe} = R_{i\text{опт}}$ , где  $R_{i\text{опт}}$  - оптимальное по шумам сопротивление источника сигнала, которое определяется типом усилительного элемента в первом каскаде предварительного усилителя. Для полевых транзи-

сторов с  $p-n$  переходом на частотах около 100 Гц  $R_{i_{opt}}$  составляет единицы мегаом. Оптимальное число витков катушки

$$W = \sqrt{R_{i_{opt}} / r_1}. \quad (6.65)$$

При  $R_{i_{opt}} = 5 \cdot 10^6$  Ом получим  $W \approx 1100$  витков. Диаметр провода при этом определим в соответствии с (6.55). При  $k_n k_3 = 0,7$  получим  $d = 1$  мм. Из (6.62) следует, что увеличение диаметра окна  $D_3$  повышает предельную чувствительность. Как мы видим, условия достижения максимальной предельной чувствительности трансформаторного датчика не совпадают с условиями оптимизации на максимум выходного напряжения. Таким образом, предельная чувствительность трансформаторного датчика определяется его геометрическими размерами и не зависит от числа витков катушки и магнитной проницаемости сердечника. В частности, чувствительность возрастает при увеличении окна катушки  $D_3$ , следовательно, диаметр провода катушки целесообразно уменьшать до тех пор, пока активное сопротивление катушки мало по сравнению с вносимым во вторичную цепь трансформатора сопротивлением первичной цепи (объемного витка). Сравнение трансформаторного и электродного датчиков по предельной чувствительности показывает, что при сравнимых габаритах и массе у трансформаторного датчика она существенно хуже, чем у электродного.

Автором выполнена экспериментальная проверка полученных формул. В частности измерение сопротивления объемного витка для датчика, диаметр и длина окна у которого соответственно равны  $D_3 = 29$  мм,  $H + D_1 - D_3 = 18$  мм, в ванне объемом 11 литров на частоте 1 кГц при удельной проводимости воды  $\sigma = 4$  См/м дало значение, на 10% превышающее рассчитанное по формуле (6.48). Это превышение объясняется ограниченными размерами ванны. Вносимое во вторичную цепь сопротивление с точностью до единиц процентов совпадает с рассчитанным по формуле (6.47). Измерено сопротивление потерь тороидальной катушки на частотах от 100 до 300 Гц, которое оказалось существенно больше,

чем на постоянном токе. На частотах меньше 100 Гц сопротивление потерь катушки мало отличается от сопротивления на постоянном токе.

#### **6.4. Повышение коэффициента преобразования трансформаторного датчика электрического поля**

Как было показано в главе 3, электродные датчики имеют значительный уровень шума при расположении в турбулизированном потоке воды, например, при буксировке. Изображенный на рисунке 6.5 трансформаторный датчик [13] (Гордиенко), содержащий герметичный магнитоэлектрический экран 1, покрытый диэлектрической оболочкой 2, диэлектрическую трубу 3, концы которой открыты в окружающую среду, тороидальную катушку 4 с кольцевым магнитопроводом 5,

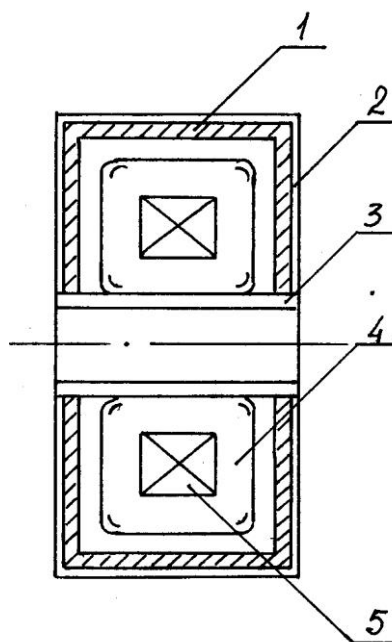


Рисунок 6.5 - Трансформаторный датчик электрического поля

не обладает этим недостатком. Однако применение его в морских исследованиях ограничено низким значением коэффициента преобразования напряженности электрического поля в выходное напряжение датчика. Поэтому чувствительность



датчика часто не может быть реализована на практике, так как требования, предъявляемые к собственному шуму предварительного усилителя приемно-усилительной аппаратуры, оказываются слишком высокими. Автором предложен трансформаторный датчик электромагнитного поля с повышенным коэффициентом преобразования, признанный изобретением [114]. Для увеличения коэффициента преобразования датчика на тороидальный магнитопровод 1 (рисунок 6.6) намотана труба 2, выполненная из диэлектрика или ферромагнитного металла с диэлектрическим покрытием контактирующей с водой поверхности, (в последнем случае между корпусом и трубой необходимо предусмотреть изолирующие втулки, препятствующие образованию вокруг магнитопровода короткозамкнутого витка).

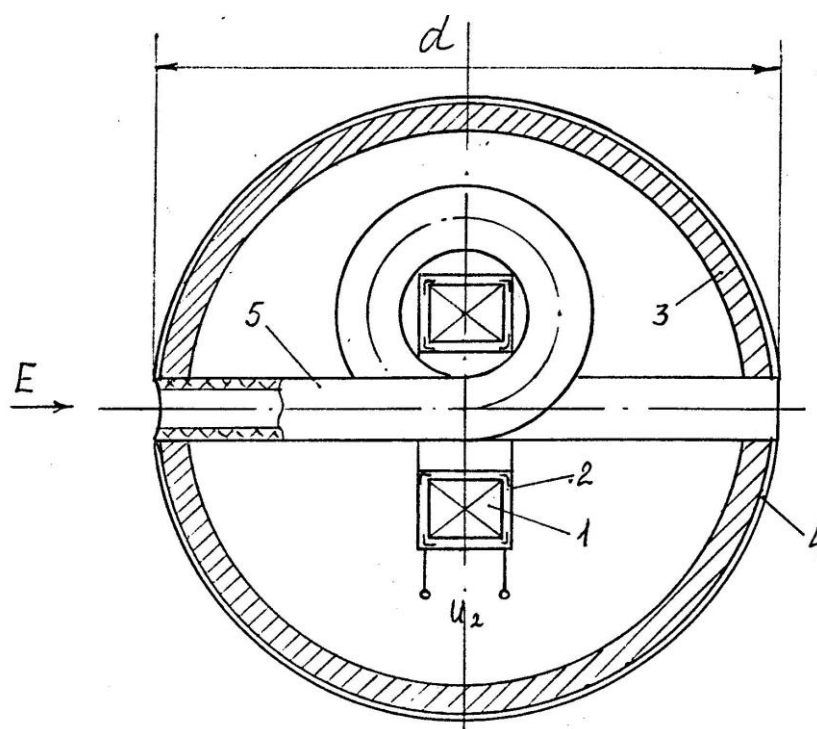


Рисунок 6.6 - Трансформаторный датчик электрического поля с повышенным коэффициентом преобразования

Концы трубы открыты в окружающую среду. Как и у известных трансформаторных датчиков, на магнитопроводе имеется обмотка 3, с которой снимается выходное напряжение датчика. Магнитопровод с обмоткой размещены внутри гермети-

зированной корпуса 4, электрически изолированного от внешней среды с помощью диэлектрического покрытия 5. В противоположных стенках корпуса сделаны отверстия, сквозь которые концы диэлектрической трубы выходят наружу. В целях защиты датчика от воздействия магнитных полей, в том числе магнитного поля Земли, являющегося причиной вибросчувствительности датчика, корпус выполнен из ферромагнитного металла и является магнитостатическим экраном. В рабочем состоянии труба датчика 2 заполнена окружающей датчик морской водой. Электрическое поле создает между концами трубы разность потенциалов  $U_1$ , величина которой пропорциональна напряженности поля  $E$  и расстоянию  $d$  между концами.

$$U_1 = kEd, \quad (6.66)$$

где  $k$  - коэффициент, учитывающий деформацию поля корпусом датчика ( $k > 1$ ). Труба 2, заполненная электролитом, играет роль первичной обмотки трансформатора, вторичной обмоткой которого является обмотка 3. Эквивалентная схема датчика, приведенная на рисунке 6.7, соответствует общепринятой схеме замещения трансформатора для области низких частот, в которой потери определяются только активным сопротивлением обмоток [70] (Кузнецов). При этом сопротивление вторичной обмотки, пересчитанное в первичную, должно быть много меньше сопротивления первичной обмотки, чтобы не ухудшать чувствительность

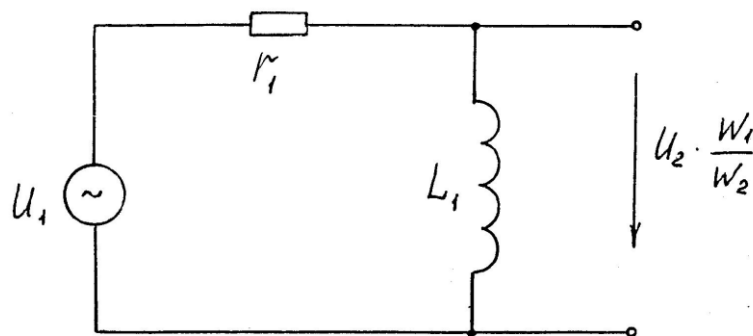


Рисунок 6.7 - Эквивалентная схема датчика

датчика. Обозначим через  $r_1$  сопротивление заполненной морской водой трубы 2, через  $L_1$  - индуктивность первичной обмотки трансформатора. Пусть датчик подключен к усилителю с высоким входным сопротивлением, которое не оказывает влияния на коэффициент преобразования и не показано, поэтому на эквивалентной схеме. Напряжение, снимаемое с обмотки 3,

$$U_2 = \frac{kEd\omega W_2 L_1}{W_1 r_1 \sqrt{1 + \omega^2 (L_1 / r_1)^2}}, \quad (6.67)$$

где  $W_1$  - число витков, образованное трубой 2,  $W_2$  - число витков вторичной обмотки 3,  $\omega$  - частота измеряемого переменного электрического поля. Индуктивность первичной обмотки при магнитопроводе прямоугольного сечения [61] (Волгов)

$$L_1 = W_1^2 \mu \mu_0 h (D_H - D_B) / (D_H + D_B), \quad (5.68)$$

где  $D_H$  - наружный диаметр кольцевого магнитопровода,  $D_B$  - внутренний диаметр магнитопровода,  $h$  - высота магнитопровода,  $\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума,  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода. При полном использовании свободной части окна магнитопровода максимальная площадь сечения трубы 2

$$S_T = S_0 / (1 + W_1), \quad (6.69)$$

где  $S_0$  - не занятая обмоткой 3 площадь окна магнитопровода. Труба 2 в этом случае имеет некруглое сечение. Длина средней линии трубы

$$l_{CP} = (d - h) + W_1 (2h + D_H). \quad (6.70)$$

Отсюда сопротивление трубы

$$r_1 = (1 + W_1) [W_1 (2h + D_H) + d - h] / (\sigma S_0), \quad (6.71)$$

где  $\sigma$  - проводимость воды. Выходное напряжение датчика

$$U_2 = \frac{kEdW_2\omega\mu\mu_0h(D_H - D_B)\sigma S_0}{(1 + W_1^{-1})[W_1(D_H + 2h) + d - h](D_H + D_B)\sqrt{1 + \omega^2(L_1/r_1)^2}}, \quad (6.72)$$

где  $L_1$  и  $r_1$  определяются из (6.68) и (6.71). Сопротивление растекания между торцами трубы в практических конструкциях датчиков много меньше сопротивления  $r_1$ , что и позволило не учитывать его в эквивалентной схеме. При этом условии для датчика, отличающегося только тем, что диэлектрическая труба прямая и занимает всю площадь  $S_0$  окна магнитопровода

$$U_2' = kE\sigma\mu\mu_0\omega W_2 S_0 h(D_H - D_B) / \pi(D_H + D_B). \quad (6.73)$$

Отношение  $U_2/U_2'$  определяет выигрыш в коэффициенте преобразования по отношению к датчику традиционной конструкции.

$$\frac{U_2}{U_2'} = \pi d \left\{ (1 + W_1^{-1}) [W_1(D_H + 2h) + d - h] \sqrt{1 + \omega^2(L_1/r_1)^2} \right\}^{-1}. \quad (6.74)$$

Рассмотрим диапазон частот,  $\omega^2 \ll (r_1/L_1)^2$ , в котором подкоренное выражение минимально и равно единице, а выигрыш не зависит от частоты. При условии  $(U_2/U_2') > 1$  получаем соотношение, которому должны удовлетворять конструктивные параметры датчика для достижения поставленной цели.

$$d > \frac{(1 + W_1)D_H + (2W_1 + 1 - W_1^{-1})h}{\pi - 1 - W_1^{-1}} \quad (6.75)$$

С ростом частоты возрастание подкоренного выражения (6.72) ограничивает рост выходного напряжения датчика, поэтому увеличение частоты по сравнению с введенным выше условием приводит к уменьшению или потере выигрыша. В соответствии с (6.68) и (6.71) условие  $\omega^2 \ll (r_1/L_1)^2$  может быть записано в виде

$$\omega^2 \ll \left\{ \frac{(1 + W_1^{-1})(D_H + D_B)[D_H + 2h + (d - h)W_1^{-1}]}{\mu\mu_0\sigma S_0^2(D_H - D_B)} \right\}^2. \quad (6.76)$$

Выигрыш  $U_2/U_2'$  достигает максимального значения

$$\frac{U_2}{U_{2 \text{ MAX}}'} = \pi \left( 1 + \frac{D_H + h}{d} + 2\sqrt{(D_H + 2h)(1 - h/d)/d} \right)^{-1} \quad (6.77)$$

при

$$W_{\text{opt}} = \sqrt{(d - h)/(D_H + 2h)}. \quad (6.78)$$

Как следует из (6.77) максимальное значение выигрыша достигает 3,14 и зависит от относительной величины размера  $d$ . В таблице 6.1 представлены результаты расчета выигрыша  $U_2/U_2'$  для  $D_H = 70$  мм,  $h = 50$  мм, выполненного по формуле

$$\frac{U_2}{U_2'} = \pi d \left\{ (1 + W_1^{-1}) [W_1(D_H + 2h) + d - h] \right\}^{-1} \quad (5.79)$$

Таблица 6.1. Выигрыш в коэффициенте преобразования по отношению к датчику традиционной конструкции при различном числе витков диэлектрической трубы и расстоянии между ее концами.

$d, \text{ мм}$		500	1000	2000	3000	4000
$W_1$	1	1,27	1,40	1,48	1,51	1,52
	2	1,33	1,62	1,83	1,91	1,95
	3	1,23	1,61	1,92	2,04	2,11
	4	1,11	1,54	1,91	2,08	2,17
	5	1,01	1,45	1,87	2,07	2,18

Для датчика, имеющего  $W_1 = 3$ ,  $D_H = 70$  мм,  $h = 50$  мм,  $D_B = 50$  мм,  $\mu = 2000$ ,  $d = 2000$  мм, при проводимости окружающей датчик морской воды  $\sigma = 4$  сим/м в соответствии с (4.25) диапазон частот, в котором справедливы расчетные формулы,

ограничен сверху несколькими единицами килогерц. Материал сердечника в этом диапазоне должен иметь тангенс угла магнитных потерь не более 0,1. Из таблицы 6.1 видно, что максимум зависимостей  $U_2/U_2'$  от  $W_1$  выражен слабо, а выигрыш, достигаемый при реальных габаритах датчика, составляет 1,5-2 раза. Выигрыш в значительной степени зависит от высоты  $h$  сердечника и с ее увеличением достигается лишь при больших значениях  $d$ .

### **6.5. Сравнение электродных и безэлектродных датчиков по достигаемой предельной чувствительности**

Электродный и трансформаторный датчики являются датчиками одного (электрического) типа, поэтому их довольно просто сравнивать. Согласно таблице 2.14 предельная чувствительность электродного датчика с учетом шумов предварительного усилителя и согласующего трансформатора составляет 0,13...0,2  $nB/m\sqrt{Гц}$  при сферических электродах радиусом 5 см и расстоянии между ними 1 м. Если электроды полые, то датчик может иметь массу около одного килограмма. В соответствии с разделом 5.3 для трансформаторного датчика с габаритами 0,2 x 0,1 м и массой около 5 кг значение предельной чувствительности  $E_{пр} = 1,95 nB/m\sqrt{Гц}$ , то есть более чем на порядок хуже.

Предельная чувствительность магнитоиндукционного датчика выражается в единицах напряженности магнитного поля, поэтому непосредственное сравнение сделать невозможно. Однако для распространяющейся в морской воде плоской волны соотношение между компонентами  $E$  и  $H$  определяется волновым сопротивлением среды

$$\eta_c \approx \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\sigma}}. \quad (6.80)$$

При  $\omega = 628$  и  $\sigma = 4$  Сим/м  $\eta_c = 0,014$  Ом. Пусть магнитоиндукционный датчик имеет следующие параметры:  $l_c = 1$  м,  $d_c = 3$  см,  $y = 0,7$ ,  $k_c \cdot k_s = 0,7$ ,  $t = 3$ ,

$\mu_{h \max} = 250$ . При этом его масса достигает 15 кг. На частоте 100 Гц ( $\omega = 628$ ) и при температуре  $T = 280\text{K}$  согласно (6.26) предельная чувствительность магнитоиндукционного датчика по магнитному полю составляет  $H_m = 12 \cdot 10^{-8} \text{ А/м}$ . В пересчете к электрическому полю  $E_m = H_m \eta_c$  предельная чувствительность магнитоиндукционного датчика составляет  $1,7 \cdot 10^{-9} \text{ В/м} \sqrt{\text{Гц}}$ , что всего на 15% лучше, чем у трансформаторного датчика. Таким образом, электродный датчик в диапазоне 3...300 Гц является лучшим по достигаемой предельной чувствительности. При этом он также имеет наименьшую массу, проще других по конструкции.

### ***6.6. Уменьшение виброшумов и повышение помехозащищенности трансформаторного датчика***

Несмотря на то, что трансформаторный датчик имеет малочувствительную к внешним магнитным полям катушку с кольцевым ферромагнитным сердечником, а также, несмотря на наличие магнитостатического экрана, трансформаторный датчик все же в значительной мере восприимчив к вибрациям в геомагнитном поле, а также к промышленным помехам в виде переменных магнитных полей. Зачастую это обстоятельство не дает возможности реализовать его высокую чувствительность. Для повышения помехозащищенности трансформаторного датчика можно улучшать его магнитную экранировку и минимизировать поле рассеяния катушки. Существует также более действенный метод подавления такого рода помех путем вычитания из выходного напряжения датчика компенсирующего сигнала, который по амплитуде и фазе уравнен с напряжением, возникающим в датчике вследствие вибрации. В частности, как показано в разделе 4.3, для подавления виброшумов компенсирующий сигнал можно получить от вибродатчиков. Однако проблематично при этом обеспечить значительное ослабление виброшумов в течение длительного времени в широком диапазоне частот вибрации. Помехи в виде переменных магнитных полей в этом случае не подавляются.

Для создания компенсирующего сигнала предлагается использовать вторую катушку с кольцевым ферромагнитным сердечником, идентичную первой. Обе катушки расположены как можно ближе друг к другу, одинаково ориентированы и механически жестко соединены. При этом катушки включены таким образом, что образующаяся в обеих катушках ЭДС индукции при вибрации в геомагнитном поле или при воздействии магнитного поля от промышленного источника помех вычитается. На рисунке 6.8 показан наш трансформаторный датчик с компенсацией виброшумов, признанный изобретением [115]. Он содержит герметичный

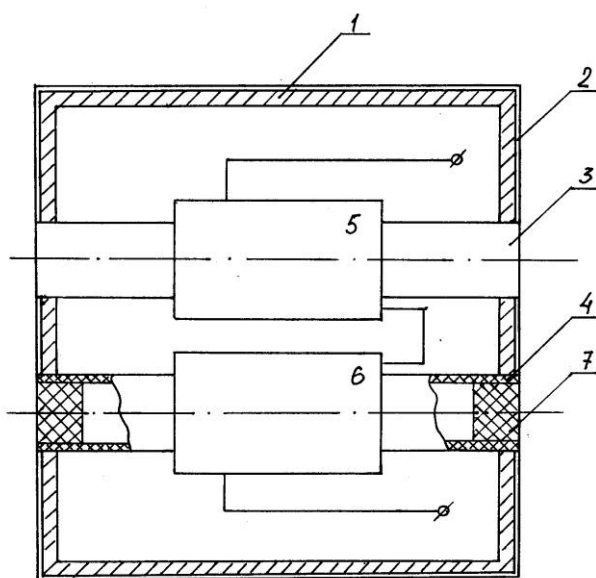


Рисунок 6.8 - Трансформаторный датчик с компенсацией виброшумов

магнитоэкранный экран 1, покрытый диэлектрической оболочкой 2, первую диэлектрическую трубу 3, концы которой открыты в окружающую среду, вторую диэлектрическую трубу 4, концы которой закупорены диэлектрическими пробками 7, первую тороидальную катушку 5 и вторую тороидальную катушку 6. Вследствие наличия диэлектрических пробок 7, вторая катушка лишена возможности принимать электромагнитное поле в воде. Благодаря этому не происходит вычитания полезного сигнала на выходе датчика. Однако собственные тепловые шумы катушек складываются по мощности, что приводит к уменьшению предельной



чувствительности датчика. Повысить ее можно путем суммирования полезного сигнала, индуцируемого в каждой из катушек. При этом необходимо создать условия для того, чтобы напряжения помех по-прежнему вычитались.

На рисунке 6.9 показан предложенный автором трансформаторный датчик с компенсацией виброшумов и защитой от магнитных полей промышленных источников, также признанный изобретением [116]. Он содержит герметичный магнитостатический экран 1, покрытый диэлектрической оболочкой 2, диэлектри-

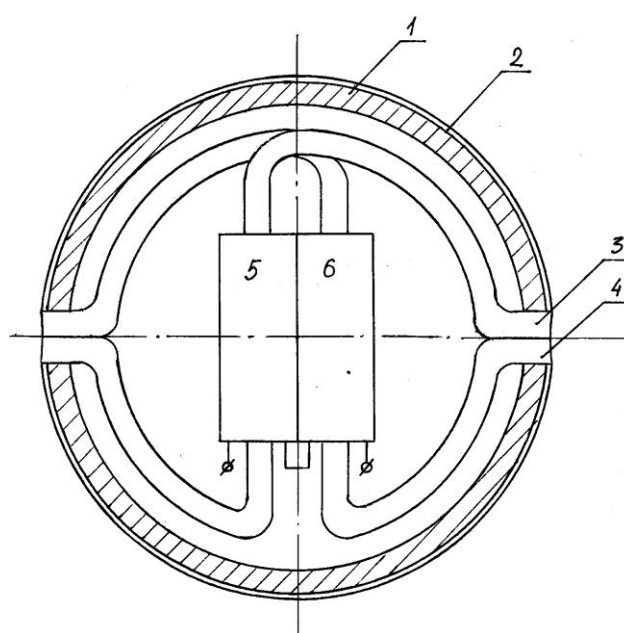


Рисунок 6.9 - Трансформаторный датчик повышенной чувствительности с защитой от виброшумов

ческую трубу 3 и вторую диэлектрическую трубу 4, концы которых открыты в окружающую среду, первую тороидальную катушку 5 и вторую тороидальную катушку 6. Ток проводимости, создаваемый в окружающей среде измеряемым электромагнитным полем, протекает по заполненным морской водой трубам 3 и 4. С целью компенсации индуцируемых ЭДС помехи и виброшумов катушки 5 и 6 соединены встречно, однако, и направление тока полезного сигнала в них тоже встречное. Поэтому полезный сигнал на выходе датчика удваивается, а собственный тепловой шум катушек 5 и 6 при этом складывается квадратично, его

предельная чувствительность выше, чем у датчика, изображенного на рисунке 6.8. Однако, учитывая в 1,5...2 раза большую, чем у датчика классического типа (рисунок 6.5), длину труб 3 и 4, можно ожидать, что величина предельной чувствительности датчика, изображенного на рисунке 6.9, примерно такая же, как у классического трансформаторного датчика, при большем коэффициенте преобразования. Недостатком данного датчика является сложность заполнения труб 3 и 4 водой, поскольку их форма способствует образованию воздушных пробок, наличие которых делает датчик неработоспособным.

### ***6.7. Краткие выводы***

В главе 6 выполнена оптимизация магнитоиндукционного датчика на максимум предельной чувствительности, за счет чего чувствительность может быть повышена до 15 процентов. Выполнена оптимизация трансформаторного датчика на максимум коэффициента преобразования, за счет которой коэффициент преобразования может быть повышен до 3 раз. Выполнено сравнение предельной чувствительности электродных и безэлектродных датчиков. Показано, что у электродных датчиков она более чем на порядок выше. Предложена конструкция трансформаторного датчика, коэффициент преобразования которого можно повысить до 2 раз путем применения витка из диэлектрической трубы в качестве первичной обмотки. Предложены конструкции безэлектродных датчиков, имеющих повышенную защищенность от внешних помех и вибрации.

## Заключение

При выполнении работы получены следующие основные результаты.

1. Исследован ряд металлов и металлических покрытий на пригодность для изготовления электродов датчиков электромагнитного поля. Рекомендовано изготавливать электроды из титана, тантала, нержавеющей стали X18H9T и 12X18H10T, которые обеспечивают низкое значение активной составляющей импеданса датчика  $R$  и большое значение емкости  $C$  датчика при хорошей стабильности этих параметров. Не рекомендовано применение металлических покрытий ввиду их нестойкости к действию морской воды.

2. Установлено, что в отсутствие движения даже у благородных и некорродирующих металлов обнаружен электрохимический (избыточный) электродный шум, не исчезающий и через несколько суток выдержки в электролите. Его величина зависит от материала электродов, шероховатости поверхности и длительности выдержки в электролите. У тантала и титана, наиболее пригодных для применения в электродных датчиках, отношение избыточного шума к тепловому на частотах в единицы герц достигает 3...4 раз. Установлено, что в первые часы и даже сутки выдержки электродов в электролите электродный шум имеет импульсы неустановленной природы с амплитудой, на два порядка превышающей среднеквадратическое напряжение шума  $\sigma$  между импульсами. Наличие импульсной составляющей более чем в 30 раз увеличивает дисперсию шума. График функции распределения плотности вероятности шума становится изрезанным и широким с отрицательным коэффициентом эксцесса ( $E = -1$ ). С течением времени импульсный шум уменьшается, а функция распределения все больше приближается к гауссовской. На частотах выше нескольких десятков герц избыточный шум у хорошо отполированных и длительно выдержанных в электролите электродов из таких металлов меньше теплового. Установлено, что для уменьшения избыточного шума необходимо увеличивать площадь электродов, полировать их поверхность и выдерживать в электролите не менее 3 суток.

3. Установлено, что при движении жидкости у датчика возникает специфический электродный шум движения, превышение которого над тепловым шумом по напряжению достигает у корродирующих электродов нескольких порядков, а у некорродирующих – до нескольких десятков раз. Именно он и определяет чувствительность буксируемых датчиков. Показано, что шумовое напряжение связано с пульсациями скорости жидкости, в частности, с турбулентностью. Спектральные зависимости шумового напряжения имеют вид  $f^{-\alpha}$  ( $\alpha \approx 1,2...1,6$ ). Показано, что напряжение шума при мелкомасштабной турбулентности в движущейся жидкости обратно пропорционально квадратному корню из площади электродов, при этом оно увеличивается с уменьшением концентрации электролита и уменьшается при выдержке электродов в электролите. Установлено, что при наличии пульсаций средней скорости потока шум движения коррелирован с пульсациями скорости, что позволяет осуществить компенсацию шума движения в приемном устройстве и повысить чувствительность более чем в два раза. Установлено, что пульсации давления жидкости не оказывают влияния на разность потенциалов между электродами. Установлено, что наименьшей величиной шума движения из исследованных металлов обладают титан, тантал, сталь нержавеющей. Величина его у перечисленных металлов практически одинакова.

4. Разработаны две математические модели возникновения электродного шума движения. В основе первой модели лежит модуляция толщины диффузионного слоя на границе электрод-жидкость набегающим пульсирующим потоком, вследствие чего изменяется скорость адсорбции кислорода поверхностью электрода. Это в свою очередь ведет к пульсациям потенциала электрода относительно жидкости. В основе второй модели лежит предположение о нарушении равновесия зарядов в двойном электрическом слое при деформации двойного электрического слоя набегающим вдоль поверхности электрода потоком электролита. Обе модели хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований. Получены формулы, определяющие величину пульсаций электродного потенциала и связь их с пульсациями скорости жидкости. Установлено, что пульса-

ция электродного потенциала, образующаяся по первой модели, имеет инерционность по отношению к пульсациям скорости, которая ограничивает спектр шума движения диапазоном частот до 30-40 Гц и экспоненциально уменьшается с течением времени. Пульсации электродного потенциала, образующиеся по второй модели, не имеют явной зависимости от времени и частоты, но значительно меньше по величине. При длительной выдержке электродов в воде второй механизм образования шума может преобладать. Показано, что результаты экспериментов подтверждают развитую теорию шума движения, а измеренные значения пульсаций электродного напряжения не противоречат расчетным.

5. Подтверждена экспериментом следующая из разработанной теоретической модели корреляционная связь шума движения с пульсациями скорости жидкости, которая позволяет осуществить частичную компенсацию шума движения и в несколько раз повысить чувствительность приемника. Предложено приемное устройство с компенсацией шума движения.

6. Доказано, что эффективным средством борьбы с шумом движения электродного датчика является применение обтекателей, снижающих скорость движения жидкости у поверхности электродов. В натурном эксперименте доказано, что применение обтекателей для электродных датчиков позволяет уменьшить их шум при движении до 10 раз по сравнению с незащищенными электродами. Показана возможность уменьшения шума движения электродного датчика также до 10 раз за счет выбора размеров и места расположения электродов, встроенных в поверхность обтекателя, а также возможность уменьшения шума до двух порядков при использовании вращающихся электродов. Тем самым показана и доказана в эксперименте возможность повышения чувствительности датчика. Предложены конструкции таких датчиков.

7. Предложено приемное устройство с кабельным электродным датчиком, в котором реализована компенсация индустриальной помехи, создаваемой силовыми электроустановками, расположенными на объекте, буксирующем кабельный электродный датчик. Это позволяет значительно уменьшить габариты датчика.

8. Показано, что единственно приемлемым способом согласования электродного датчика с приемным устройством для минимизации влияния теплового шума является трансформаторное согласование. Определены условия трансформаторного согласования электродных датчиков с входными каскадами приемного устройства, обеспечивающие максимальное значение чувствительности. Выполнено сравнение материалов электродов по достигаемой предельной чувствительности датчика на частоте 90 Гц. Оно показало, что все рекомендованные выше материалы в датчике реальных размеров (сферические электроды радиусом 5 см разнесены на расстояние 1 м) обеспечивают близкие значения предельной чувствительности в пределах  $0,13...0,2 \text{ нВ/м}\sqrt{\text{Гц}}$ . Выполнена оптимизация входного трансформатора на минимум шума.

9. Разработана методика оптимизации магнитоиндукционного датчика, позволяющая за счет выбора формы катушки достичь максимального отношения напряжения сигнала к собственному тепловому шуму. Увеличение предельной чувствительности такого датчика в результате оптимизации достигает 10...15 процентов. Разработана методика оптимизации трансформаторного датчика, которая при заданных габаритах позволяет в несколько раз увеличить коэффициент преобразования за счет оптимального выбора соотношений размеров сердечника и катушки и повысить чувствительность приемного устройства, если датчик соединен с ним длинным кабелем. Определена чувствительность магнитоиндукционного и трансформаторного датчиков. Показано, что в диапазоне 3...300 Гц электродный датчик имеет наивысшую из рассмотренных типов датчиков предельную чувствительность.

10. По результатам проведенных исследований предложены новые конструкции безэлектродных и электродных датчиков (в том числе кабельного датчика), признанные изобретениями. Они имеют более высокую чувствительность в условиях буксировки и вибрации или коэффициент преобразования по сравнению с известными.

## Выводы и практические рекомендации

Результаты исследований, выполненных в рамках диссертации, можно квалифицировать как крупное научное достижение в развитии теории и техники приема низкочастотного электромагнитного поля в морской воде, имеющее при этом важное прикладное значение. Впервые проведено всестороннее исследование электродного шума, в частности, измерены статистические характеристики и выявлены свойства электродного шума и методы его уменьшения, создана теория шума движения, показана возможность осуществления высокочувствительных приемных устройств с малогабаритными буксируемыми датчиками. При меньших на 1...2 порядка габаритах они могут обеспечить чувствительность, сравнимую с чувствительностью длинного кабельного датчика. У датчика с незащищенными электродами в виде шаров радиусом 60 мм при расстоянии между электродами 1 м при скорости 3 м/с собственный шум, пересчитанный к электрическому полю, имеет величину порядка  $15-20 \text{ нВ/м}\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 30 Гц и порядка  $5-7 \text{ нВ/м}\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 100 Гц (раздел 5.2). Кабельный датчик с длиной активной части 300 м при скорости 3 м/с в диапазоне 75...100 Гц по данным [7] (Бернстайн) имеет шум в виде электрической составляющей электромагнитного поля порядка  $1 \text{ нВ/м}\sqrt{\text{Гц}}$ , то есть в 5-7 раз меньше. Эффективным средством уменьшения шума движения (до десяти раз) является установка на электроды обтекателей, выполненных по рекомендациям автора (раздел 4.4). Применение в кабельном датчике электродов с обтекателями (раздел 5.1) дает возможность уменьшить длину его активной части в несколько раз, а применение компенсации индустриальной помехи (раздел 5.3) позволяет уменьшить и длину его пассивной части. В результате можно получить ту же чувствительность при общей длине кабельного датчика порядка 200 м вместо 600...1000 м или в несколько раз повысить чувствительность датчика. Еще большего уменьшения размеров электродного датчика можно добиться при применении компенсации электродного шума движения (в несколько раз), описанной в разделе 5.2, а также, как показано в раз-

деле 4.3, при применении вращающихся электродов (в десятки раз). Описанные методы борьбы с электродным шумом движения позволяют приблизить чувствительность малогабаритного движущегося электродного датчика к значениям, характерным для неподвижного датчика с расстоянием между электродами 1 м, то есть до значений  $0,3 - 0,5 \text{ нВ/м}\sqrt{\text{Гц}}$  на частотах 30-100 Гц.

При приеме электромагнитного поля на неподвижном подводном объекте можно применять как электродные, так и безэлектродные датчики. Безэлектродные датчики (магнитоиндукционный и трансформаторный) обеспечивают возможность приема в диапазоне частот 30...100 Гц при напряженности электрической составляющей электромагнитного поля порядка  $2 \text{ нВ/м}\sqrt{\text{Гц}}$ , что на порядок хуже, чем обеспечивают электродные датчики в отсутствие движения. Однако электродный датчик небольших размеров имеет и небольшое выходное напряжение, поэтому для реализации высокой чувствительности электродного датчика необходимо согласовать его с малозумящим предварительным усилителем с помощью трансформатора. При этом к коэффициенту шума предварительного усилителя и трансформатора предъявляются весьма высокие требования, которые сложно удовлетворить, тем более что согласующий трансформатор должен иметь коэффициент трансформации порядка 1000. Безэлектродные датчики не предъявляют высоких требований к усилителю и трансформатору и имеют сравнительно небольшие габариты, но имеют большую массу и конструктивно значительно сложнее электродных. Оптимизация безэлектродных датчиков по методике автора дает возможность повысить чувствительность или уменьшить требования к приемно-регистрающей аппаратуре. Ввиду большой сложности и высокой стоимости экспериментов по приему электромагнитного поля сверхнизкой и крайне низкой частоты в море, для внедрения в практику разработанных методов приема и технических средств необходимо участие заинтересованных организаций в осуществлении таких экспериментов и разработке промышленной аппаратуры.



### Список литературы

1. Акиндинов, В.В. Электромагнитные поля в морской воде (обзор) / В.В. Акиндинов, В.И. Нарышкин, А.М. Рязанцев. // Радиотехника и электроника. - 1976. - Т. 21, №5. - С. 913-944.
2. Федынский, В.В. Разведочная геофизика: геофизические методы исследования земной коры, поисков и разведки полезных ископаемых. / В.В. Федынский. - М.: Недра, 1964. - 672 с.
3. Palshin, N.A. Oceanic electromagnetic Studies: A review / N.A. Palshin // Surveys in Geophysics. - 1996. - Vol. 17, №4. - P. 455-491.
4. Взаимодействие электромагнитных полей контролируемых источников СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой: Материалы Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара. В 2 т. / Рос. акад. наук, Отд. наук о Земле, Кольский научный центр, Геологический институт; гл. ред. академик РАН Е.П. Велихов, зам. гл. редактора д.г.-м.н. Ю.Л. Войтеховский. - Апатиты, 2014. - Т. 1. - 206 с.
5. Взаимодействие электромагнитных полей КНЧ-СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой. Материалы I Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара. Т. 2 // Рос. акад. наук, Отд. наук о Земле, Кольский научный центр, Геологический институт, гл. ред. акад. РАН Е.П. Велихов, зам. гл. ред. д.г.-м.н. Ю.Л. Войтеховский, председатель ред. коллегии д.г.-м.н. А.А. Жамалетдинов – Апатиты, 2015. – 112 с.
6. Гордиенко, В.И. Электромагнитное обнаружение инженерных коммуникаций и локальных аномалий / В.И. Гордиенко, В.П. Убогий, Е.В. Ярошевский. - Киев: Наукова думка, 1981. - 82 с.
7. Бернстайн, С.Л. Дальняя связь на крайне низких частотах (обзор) / С.Л. Бернстайн [и др.] // ТИИЭР. - 1974. - Т. 62, №3. - С. 5-30
8. Burrows, M.L. ELF communication system design / M.L. Burrows, C.W. Niessen // Ocean 72. IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment. Pub. Of I.E.E.E. - 1972. - P. 95-109.

9. Связь и АСУ Военно-Морского Флота. 1909-2009: юбилейное издание. / - М.: Информационный мост, 2009. - 179 с.
10. Роль российской науки в создании отечественного подводного флота/ под общ. ред. А.А. Саркисова: РАН. -М: Наука, 2008. - 654 с.
11. Зимин, Е.Ф. Измерение напряженности электрических и магнитных полей в проводящих средах / Е.Ф. Зимин, Э.С. Кочанов. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 256 с.
12. Кочанов, Э.С. Измерение электрического поля токов проводимости в сверхнизкочастотном диапазоне (обзор) / Э.С. Кочанов, Е.Ф. Зимин. Радиотехника и электроника. - 1982.- Т. 27, №7. - С. 1249-1267.
13. Гордиенко, В.И. Измерение низкочастотных вихревых электрических полей. / В.И. Гордиенко, Н.И. Калашников, К.Д. Надточий. - Киев: Наукова думка, 1975. – 87 с.
14. Lenz, J.E. A Review of magnetic Sensors. // J.E. Lenz /Proceedings of the IEEE. - 1990. - Vol. 78, №6. - P. 973-989.
15. Ван дер Зил, А. Шум. Источники, описание, измерение. Пер. с англ. В.Н. Кулешова и Д.П. Царапкина, под ред. А.К. Нарышкина / А. Ван дер Зил.- М.: Сов. Радио, 1973. - 178 с.
16. Богородский, М.М. Электрокинетические помехи при электрометрических работах на акваториях. / М.М. Богородский // Сборник «Исследование космической плазмы». - М.: ИЗМИРАН СССР, 1980. - С. 152-158.
17. Богородский, М.М. Исследование контактных первичных измерительных преобразователей электрического поля в море / М.М. Богородский // Сборник «Проблемы морских электромагнитных исследований». - М.: ИЗМИРАН СССР, 1980. - С. 155-161.
18. Гонтар, И.М. О выборе оптимальной толщины обмотки инфранизкочастотного индукционного датчика с ферромагнитным сердечником / И.М. Гонтар // Отбор и передача информации. Республиканский межведомственный сб-к науч. трудов. - Киев: Наукова думка. - 1982. - вып. 65. - С. 45-50.

19. Дуб, П.Б. Расчет оптимальных параметров низкочастотного индукционного преобразователя при работе в полосе частот / П.Б. Дуб, Л.Я. Мизюк. // Отбор и передача информации. Республиканский межведомственный сб-к науч. трудов. - Киев: Наукова думка. – 1987. - вып.76. - С. 79-85.
20. Дуб, П.Б. Оптимизация конструктивных параметров индукционных преобразователей с целью достижения нижнего порога чувствительности. / П.Б. Дуб, Л.Я. Мизюк, В.А. Ничога. // Отбор и передача информации. Республиканский межведомственный сб-к науч. трудов. - Киев: Наукова думка. - 1989. - вып. 79. - С. 64-68.
21. Kruger, B. Sanguine system overview. / B. Kruger // Ocean 72. IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment. Pub. Of I.E.E.E. - 1972. - P. 91- 94.
22. Rivera, D. Towed antennas for US Submarine Communications: A Historical Perspective. / D. Rivera, R. Bansal // IEEE Antennas and Propagation Magazine. - 2004. - Vol. 46, №1. - P. 23-26.
23. Fessenden, C.T. Development of a trailing-wire E-field submarine antenna for extremely low-frequency (ELF) reception /C.T. Fessenden, D.H.S. Chang. // IEEE Transaction on Communications. – 1974. - COM-22, №4. - P. 428-437.
24. Burrows, M.L. Motion–induced noise in electrode-pair extremely low-frequency (ELF) receiving antennas. /M.L. Burrows // IEEE Transaction on Communications. – 1974. - COM-22, №4. - P. 540-542.
25. Crona, L. Field Tests of a New Type of Graphite-Fiber Electrode for Measuring Motionally Induced Voltages / L. Crona, T. Fristedt, P. Lundberg, P. Sygray // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 2001. - Vol. 18, №1. - P. 92-99.
26. Bernstein, S.L. A signaling scheme and experimental receiver for extremely low frequency (ELF) communication / S.L. Bernstein, D.A. McNeill, I. Richer. // IEEE Transaction on Communications. – 1974. - COM-22, №4. - P. 508-528.
27. Lukoschus, D. G. Optimization theory for induction-coil magnetometers at higher frequencies /D. G. Lukoschus // IEEE Transaction on Geosciences Electronics. – 1979. - Vol. 6E-17, №3. - P. 56-63.

28. Munkholm, M.S. Motion-induced noise from vibration of a moving TEM detector coil: characterization and suppression / M.S. Munkholm // *Journal of Applied Geophysics*. – 1997. - Vol. 36. - P. 21-29.
29. Александров, М.С. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ: [монография] / М. С. Александров [и др.], отв. ред. к. т. н. М. С. Александров; АН СССР. Ин-т радиотехники и электроники. - М.: Наука, 1972. - 195с.
30. Блюх, П.В. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земли-ионосфера / П.В. Блюх, А.П. Николаенко, Ю.Ф. Филиппов. - Киев: Наукова думка, 1977. - 200 с.
31. Soderberg, E.F. ELF noise in the sea at depths from 30 to 300 meters / E.F. Soderberg // *Journal of Geophysics Research*. – 1969. - Vol. 74, №9. - P. 2376-2381.
32. Мальцев, Ю.П. Шум и флуктуации сигнала электромагнитного расходомера / Ю.П. Мальцев, А.А Мейстер, М.Э. Тоомет // Сб. материалов к VII Таллинскому Совещанию по электромагнитным расходомерам и электротехнике жидких проводников. Вып. 1. Электромагнитные расходомеры. - Таллин, 1976. - С. 68-70.
33. А.с. 1236403, МПК G01V 3/06. Устройство для измерения естественного электрического поля в море. / И. И Плаксин, Б. В. Стрелков, В. В. Соколовский, О. И. Мисеюк, Д. Ю. Хорев (РФ). - №3817961/24-25; заявл.18.10.84; опубл. 07.06.86, Бюл. №21.
34. Смайт, В. Электростатика и электродинамика / В. Смайт / - М.: ИЛ, 1954.- 604 с.
35. Фрумкин, А.Н. Кинетика электродных процессов / А.Н. Фрумкин [и др.] - М.: Изд-во МГУ. - 1952. - 319 с.
36. Скорчеллетти В.И. Теоретическая электрохимия / В.И. Скорчеллетти / - Л.: Химия, 1974. - 576 с.
37. Одынец, Л.Л. Кинетические процессы на границе окисел-электролит./ Л.Л. Одынец, Е.Я. Ханина. // Анодные окисные пленки: межвузовский сб-к. Петрозавод. гос. университет. - Петрозаводск, ПГУ, 1978. - С. 12-18.

38. Одынец, Л.Л. Электропроводность систем металл-окисел-электролит. / Л.Л. Одынец, С.С. Чекмасова // Электрохимия. – 1973. - Т. 9, вып. 8. - С. 1120-1124.
39. Проектирование усилительных устройств/ под ред. Н.В.Терпугова. - М.: Высшая школа, 1982. - 190 с.
40. Жалуд, В. Шумы в полупроводниковых устройствах / В. Жалуд, В.Н. Кулешов. - М.: Сов. радио, 1977. - 416 с.
41. Богородский, М.М. Экспериментальное определение термоэлектрических потенциалов в солевых мостах, выполненных морской водой. / М.М. Богородский, В.В. Новыш. Сборник «Морские электромагнитные поля». - М.: ИЗМИРАН СССР, 1976. - С. 56-70.
42. А.с. 1755231, МПК G01V 3/06. Первичный преобразователь для измерения напряженности электрического поля в проводящих средах./ Ю.А. Астахов, Э.С. Кочанов, О.И. Мисеюк, И.И. Плаксин, А.Л. Собисевич (РФ). - №4827567/25; заявл. 29.03.91; опубл.15.08.92, Бюл. №30.
43. А.с. 1735789, МПК G01V 3/06. Датчик электрического поля «Белка»./ М.М. Богородский, Е.Ф. Зимин. О. В. Коробков (РФ). - №4685203; заявл. 24.04.89; опубл. 23.05.92, Бюл. №19.
44. Тягай, В.А. Равновесные флуктуации в электрохимических процессах. /В.А. Тягай, Н.Б. Лукьянчикова // Электрохимия. – 1967.- Т. 3, вып. 3. - С. 316-322.
45. Тягай, В.А. Шумы электрохимических систем (обзор). // В.А. Тягай/ Электрохимия. –1974. - Т.10, вып. 1. - С. 3-24.
46. Мейстер, А.А. Исследование случайных шумов датчика электромагнитного расходомера. // А.А. Мейстер/ Сб. научно-технических статей НИСЭТИ. Вып. 6. Автоматика и вычислительная техника. - М.: Энергия, 1967. - С. 32-33.
47. Козлов, В.А. Собственные шумы молекулярно – электронных преобразователей. / В.А. Козлов, М.В. Сафонов. // ЖТФ. – 2003. - Т. 73, вып.12. - С.81-83.
48. Касимзаде, М.С. Электрокинетические преобразователи информации. / М.С. Касимзаде, Р.Ф. Халилов, А.Н. Балашов. - М.: Энергия, 1973. - 136 с.
49. Hladky, K. The measurement of corrosion using electrochemical 1/f noise /K. Hladky, J.L. Dawson. // Corrosion Science. – 1982. - Vol. 22, №3. - P. 231-237.

50. Halford, D. A general mechanical model for  $|f|^\alpha$  spectral density random noise with spectral reference to flicker noise  $1/|f|$  / D.A. Halford // Proceedings of the IEEE. – 1968. - Vol. 56, №3, - P. 251-258.
51. Mabbutt, S. Developments of the electrochemical noise method (ENM) for more practical assessment of anti-corrosion coatings. / S. Mabbutt, D. J. Mills, C. Woodcock. // Progress in Organic Coatings. – 2007, - Vol. 59, №3, - P. 192-196.
52. Григин, А.П. Влияние относительного движения электролита на электродный потенциал / А.П. Григин, Н.В. Петькин. // Электрохимия. – 1987. - Т. 28, вып. 8. - С. 1146-1149.
53. Рейнольдс, А. Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях. Пер. с англ. / А. Дж. Рейнольдс. - М.: Энергия, 1979. - 408 с.
54. Харин, С.Е. Физическая химия / С.Е. Харин - Киев: Изд-во Киевского ун-та, 1961. – 555 с.
55. Духин, С.С. Электрофорез / С.С. Духин С.С, Б.В. Дерягин. - М.: Наука, 1976. - 328 с.
56. Дамаскин, Б.Б. Введение в электрохимическую кинетику / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий. - М.: Высшая школа, 1983.- 400 с.
57. А.с. 1337853, МПК G01V 3/06. Устройство для измерения напряженности естественного электрического поля в море. / Б. В. Стрелков, В.В. Соколовский, Д.Ю. Хорев, А.С. Белов (РФ). - №4024620; заявл. 29.12.85; опубл. 15.09.87, Бюл. №34.
58. А.с. 1442959, МПК G01V 3/06. Устройство для измерения естественного электрического поля в проводящих средах. / Ю.В. Аболымов, Б. В. Стрелков, В.В. Соколовский, Д.Ю. Хорев (РФ). - №4232773/31-25; заявл. 22.04.87; опубл. 07.12.88, Бюл. №45.
59. Калихман, С.Г. Основы теории и расчета радиовещательных приемников на полупроводниковых приборах / С.Г. Калихман, Я.М. Левин. - М.: Связь, 1969, 480 с.

60. Афанасенко, М.П. Магнитные элементы с кольцевым сердечником во внешнем магнитном поле / М.П. Афанасенко, Р.Я. Беркман. // Отбор и передача информации. Республиканский межведомственный сб-к науч. трудов. - Киев: Наукова думка. – 1971. - №27. - С. 55-58.
61. Волгов, В.А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры / В.А. Волгов. - М.: Энергия, 1977, 655 с.
62. Акиндинов, В.В. Шумы электродных датчиков в морской воде / В.В. Акиндинов, И.В. Лишин, В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 1984. -Т. 29, №3. - С. 484-490.
63. Максименко, В.Г. Статистические характеристики нестационарного шума электродного датчика. / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 2013.- Т. 58, №8. - С. 768-775.
64. Максименко, В.Г. Статистические характеристики шума электродного датчика в растворе NaCl / В.Г. Максименко, С.В. Миронов, В.В. Лепехин // 4-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», 29 ноября – 3 декабря 2010 г.: сб. докладов. – М., 2010. С. 116-119.
65. Максименко, В.Г. Импедансные характеристики и предельная чувствительность электродных датчиков электромагнитного поля в морской воде / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. -2006. - Т. 51, № 7. - С. 786-795.
66. Максименко, В.Г. Оптимизация входного трансформатора / В.Г. Максименко// Радиотехника. -1985. - №12. - С. 81-83
67. Максименко, В.Г. Добротность тороидальных катушек индуктивности на низких частотах / В.Г. Максименко // Радиотехника. -1990. - №6. - С. 91-93.
68. Максименко, В.Г. Оптимизация входного трансформатора низкой частоты на кольцевом сердечнике / В.Г. Максименко // Радиотехника. - 1990. - №8. - С. 22-24.
69. Максименко, В.Г. О применении входного трансформатора в высокочувствительной измерительной аппаратуре СНЧ диапазона / В.Г. Максименко // Исследование естественных случайных радиополей в диапазонах КНЧ, СНЧ и

- ОНЧ: сб. трудов под ред. акад. Ю.Б. Кобзарева / ИРЭ АН СССР. - М., 1985. - С. 124-134.
70. Кузнецов, В.К. Трансформаторы усилительной и измерительной аппаратуры / В.К. Кузнецов, Б.Г. Оркин, Ю.С. Русин. - Л.: Энергия, 1969. - 218 с.
71. Максименко, В.Г. Экранирование катушки индуктивности от воздействия статического магнитного поля / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 1994. - Т.39, №1. - С. 73-75.
72. Дякин, В.А. Возможность обнаружения подводного кабеля по переизлучаемому им электромагнитному полю. / В.А. Дякин, А.С. Гугин, В.И. Каевицер, С.И. Киселев, И.В. Лишин, В.Г. Максименко, Н.И. Михалев, В.И. Нарышкин. // Радиотехника и электроника. - 2002. - Т. 47, № 11. - С. 1296-1303.
73. Максименко, В.Г. Проблемы уменьшения собственного шума электродных датчиков электрического поля, движущихся в электролите / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 2002. - Т. 47, №7. - С. 809-813.
74. Максименко, В.Г. Шум электродного датчика в пульсирующем потоке жидкости / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. – 2017. - Т. 62, №11. - С1086-1093.
75. Максименко, В.Г. Шум электродного датчика в потоке жидкости / В.Г. Максименко // Измерительная техника. - 2017. - №9.- С. 57-61.
76. Акиндинов, В.В. Экспериментальные исследования поляризации металлического электрода при движении в электролите / В.В. Акиндинов, В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 1996. - Т. 41, №8. - С. 985-989.
77. А.с.1067360, МПК G01 V 3/06. Способ измерения скорости потока жидкости / В.В. Акиндинов, И.В. Лишин, В.Г. Максименко (РФ). - №3341827/18-10, заявл. 11.09.81; опубл. 15.01.84, Бюл. №2.
78. Пат. 159105 РФ на пол. модель, МПК G01F 1/06. Устройство для измерения скорости жидкости / В.Г. Максименко, О.Г. Максименко, Я.В. Мачина (РФ). - № 2015130206/28, заявл. 21.07.2015, опубл. 27.01.2015, Бюл. №3.



79. Пат. 2594989 РФ на изобр., МПК G01P 5/08. Устройство для измерения скорости жидкости / В.Г. Максименко, О.Г. Максименко, Я.В. Мачина (РФ). - №2015130143/28, заявл. 21.07.2015, опубл. 28.08.2016, Бюл. №23.
80. Максименко, В.Г. «Шум движения» электродных датчиков электрического поля в море и пути его уменьшения / В.Г. Максименко, В.И. Нарышкин // Радиотехника и электроника. - 2003. - Т. 48, №1. - С. 70-76.
81. Максименко, В.Г. Шум электродного датчика в движущейся жидкости / В.Г. Максименко // 6-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», 19 – 22 ноября 2012 г.: сб. докладов. – М., 2012.- Т.2. - С. 281-285.
82. Максименко, В.Г. Поляризация металлического электрода при движении в электролите / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 1997.- Т. 42, №2.- С. 210-213.
83. Максименко, В.Г. Пульсации напряжения электродного датчика в потоке электролита. / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 2018.- Т. 63, №7.- С. 720-726.
84. Максименко, В.Г. Шум движения электродного датчика и его связь с пульсациями скорости жидкости. / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 2020.- Т. 65, №10.- С. 987-993.
85. Монин, А.С. Статистическая гидродинамика. Ч.2./ А.С. Монин, А.М. Яглом. - М.: Наука, 1967. - 720 с.
86. Закревский, В.А. Собственные шумы буксируемой кабельной совмещенной приемной антенны и оценка возможности ее использования в качестве датчика сейсмических волн / В.А. Закревский, В.А. Пахотин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. -2015. –Т.8, №4, С. 64-66.
87. Максименко, В.Г. Уменьшение шума движения морского электродного датчика электрического поля. / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 2022.- Т. 67, №3.- С.268-274.

88. Максименко, В.Г. Вращающийся электрод в датчике электрического поля . / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 2021.- Т. 66, №5.- С. 436-442.
89. Пат. 2745588 РФ на изобр., МПК G01V3/08. Электродный датчик напряженности электрического поля в море. / В.Г. Максименко.- 2020119841/28, заявл. 08.06.2020, опубл. 29.03.2021, Бюл. №10.
90. Пат. 2752135 РФ на изобр., МПК G01N3/06. Электродный датчик напряженности электрического поля в море. / В.Г. Максименко. – 2020132071, заявл. 28.09.2020, опубл. 23.07.2021, Бюл.№21.
91. Пат. 210891 РФ на полезную модель, МПК G01N 3/06. Устройство для приема электромагнитного поля в море / В.Г. Максименко.- 2021134023, заявл. 22.11.2021, опубл. 12.05.2022, Бюл. №14.
92. Пат. 2789467 РФ на изобр., МПК G01V 3/02. Электродный датчик напряженности электрического поля в море. / В.Г. Максименко. – 2022112710, заявл. 05.05.2022, опубл. 03.02.2023, Бюл.№4.
93. Пат. 2497153 РФ на изобр., МПК G01V 3/02. Устройство для измерения турбулентных пульсаций скорости потока жидкости / В.Г. Максименко, Д. В. Максименко. - 2012123775/28, заявл. 07.06.2012, опубл. 27.10.2013, Бюл. № 30.
94. Левич, В.Г. Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. - М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1959. – 700 с.
95. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя./ Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
96. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика./ Л. Прандтль. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.
97. А.с. 1697525, МПК G01 V 3/06. Датчик напряженности электрического поля в электролитах / В.В. Акиндинов, И.В. Лишин, В.Г. Максименко, Кулаков А.Ф, Литвинов А.Л. (РФ). - № 4766003/25, заявл. 07.12.1989, опубл. 20.07.1999, Бюл. № 20.

98. А.с. 1409959, МПК G01 V 3/06. Датчик напряженности электрического поля / В.В. Акиндинов, И.В. Лишин, В.Г. Максименко (РФ). - № 4169962/31-25; заявл. 30.12.86, опубл. 15.04.89, Бюл. №7.
99. А.с. 1629890, МПК G01 V 3/08. Датчик напряженности электрического поля / В.В. Акиндинов, И.В. Лишин, В.Г. Максименко (РФ). -№ 4677887/25; заявл. 12.04.89, опубл. 23.02.91, Бюл. № 7.
100. Пат. 136593 РФ на пол. модель, МПК G01V 3/06. Кабельный электродный датчик электрического поля / В.Г. Максименко, Д.В. Максименко. - 2013130770/28, заявл. 04.07.2013, опубл. 10.01.2014, Бюл. №1.
101. Пат. 139214 РФ на пол. модель, МПК G01V 3/06. Кабельный электродный датчик электрического поля / В.Г. Максименко, Д.В. Максименко. - 2013130799/28, заявл. 04.07.2013, опубл. 10.04.2014, Бюл. №10 .
102. Максименко, В.Г. Компенсация «шума движения» электродного датчика напряженности электрического поля в морской воде / В.Г. Максименко // Измерительная техника. - 2019.- №1.- С. 58-62.
103. Пат. 2691165 РФ на изобр., МПК G01V 3/06. Устройство для приема электромагнитного поля в море. / В.Г. Максименко. - 2018118888, заявл. 22.05.2018, опубл. 11.06.2019 г., Бюл.№17.
104. Максименко, В.Г. Компенсация промышленной помехи при приеме сверхнизкочастотного электромагнитного поля в море. / В.Г. Максименко //Радиотехника и электроника. - 2020.- Т. 65, №2.- С. 141-144.
105. Пат. 2702235 РФ на изобр., МПК H04B 7/08. Приемное устройство для радиосвязи с подводным объектом. /В.Г. Максименко. – 2019101243, заявл. 14.01.2019, опубл. 07.10.2019 г., Бюл. №28.
106. Лаврентьев, М.А. Проблемы гидродинамики и их математические модели / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. - М.: Наука, 1973. - 416 с.
107. Патент № 2548126 РФ на изобр., МПК G01P 5/08. Устройство для измерения пульсаций скорости потока электропроводной жидкости./ Дыкман В. З., Ефремов О. И., Барабаш В. А. (РФ). - 2014151935/93; заявл.18.12.2014, опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.

108. Неганов, В.А. Электродинамика и распространение радиоволн. Учебное пособие / Под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. Изд. 3-е, доп. и перераб./ В.А. Неганов, О.В. Осипов, С.Б. Раевский, Г.П. Яровой. – М.: Радиотехника, 2007. – 744 с.
109. Максименко, В.Г. Оптимизация магнитной антенны СНЧ диапазона / В.Г. Максименко // Радиотехника. - 1990. - №4. - С. 88-90.
110. Максименко, В.Г. Оптимизация морского трансформаторного датчика переменного электрического поля / В.Г. Максименко // Измерительная техника. - 2007. - №4. - С. 59-61.
111. Максименко, В.Г. Предельная чувствительность трансформаторного датчика переменного электрического поля в море / В.Г. Максименко // Измерительная техника. - 2008. - №7. - С. 51-53.
112. Максименко, В.Г. Чувствительность низкочастотного магнитоиндукционного датчика / В.Г. Максименко // Радиотехника. - 2009.- №8, С. 44-47.
113. Максименко, В.Г. Трансформаторный датчик переменного электрического поля для морских исследований / В.Г. Максименко // Измерительная техника. - 1997. - №8. - С. 59-61.
114. А.с. 1762645, МПК G01V 3/06. Морской датчик напряженности электрического поля / В.Г. Максименко. - 4779297/25, заявл. 08.01.1990, опубл. 20.07.99, Бюл. № 20.
115. А.с. 1697524, МПК G01 V 3/06. Устройство для измерения напряженности электрического поля в электролитах / И.В. Лишин, В.Г. Максименко (РФ). - №4757895/25; заявл. 10.11.89; опубл. 20.07.99, Бюл. № 20.
116. Пат. 2353953 РФ на изобр., МПК G01V3/10. Трансформаторный датчик переменного электрического поля / В.Г. Максименко.- 2007124745/28, заявл. 03.07.2007, опубл. 27.04.2009, Бюл. №12.
117. Колачевский, Н.Н. Флуктуационные явления в ферромагнитных материалах / Н.Н. Колачевский. - М.: Наука, 1985. - 184 с.
118. Каевицер, В.И. Радиофизический метод измерения координат и глубины расположения электрического кабеля, проложенного по дну водоема / В.И. Кае-

- вицер, И.В. Лишин, В.Г. Максименко, В.И. Нарышкин, В.А. Дякин, А.В. Гашевский, О.С. Гашевская. // Радиотехника и электроника. - 2004. - Т. 49, № 4. - С. 450-453.
119. Максименко, В.Г. Измерение низкочастотного электромагнитного поля в водоемах Подмосковья. /В.И. Нарышкин, В.Г. Максименко, А.В. Гатилов // Региональная XIII конференция по распространению радиоволн, Санкт-Петербург, 13 ноября - 15 ноября 2007 года: тезисы докладов. – СПбГУ, 2007, С.68-69.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Академия наук СССР  
 НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМЕ  
 «СТАТИСТИЧЕСКАЯ  
 РАДИОФИЗИКА»

103907, Москва, Центр, ГСП-3,  
 проспект Маркса, 18 ПРЭ  
 Для телеграмм: Москва, Аэлита  
 Тел.: 203-36-89

Б.02.90: П256-2312.2/2

На № \_\_\_\_\_

Ученому секретарю Института  
 радиотехники и электроники АН СССР  
 профессору К.И. Палатову

Г. Чусовый *ГЧ* 28.02.90

Г. Аксенович ВВ

Дне сего

*ГЧ* 28.02.90

Сообщаем, что результат научно-исследовательской работы, связанный с разработкой и испытанием в натуральных условиях датчика электрического поля, позволяющего более, чем на порядок, по сравнению с известными датчиками, снизить уровень помех при измерении напряженности электрического поля СНЧ-СДВ диапазонов в движущихся турбулированных потоках электролитов,

о котором сообщалось в Вашем письме (исх. № П210-2312-3343 от 22.10.89), признан Научным советом АН СССР по проблеме "Статистическая радиофизика" важным и включен в "Отчет о важных и важнейших результатах научных исследований в области статистической радиофизики за 1989 год", представленный Научным советом в Отделение общей физики и астрономии АН СССР.

Председатель Научного совета  
 академик

*Ю.Б. Кобзарев*

Ю.Б. Кобзарев

Ученый секретарь Научного совета  
 К.Т.Н.

*З.М. Бакленева*

З.М. Бакленева