

На правах рукописи

ГРЕХОВ ИВАН СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОВЕРКИ МЕДИЦИНСКИХ ХЛОР-СЕРЕБРЯНЫХ
ЭЛЕКТРОДОВ И МЕДИЦИНСКИХ НАНОЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ СЪЕМА
ПОВЕРХНОСТНЫХ БИОПОТЕНЦИАЛОВ ЧЕЛОВЕКА**

**специальность: 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского
назначения**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Томск - 2008

Работа выполнена в НИИ интроскопии при Томском политехническом университете

Научный руководитель: - доктор технических наук, профессор
Авдеева Диана Константиновна

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор
Агафонников Виктор Филиппович

- кандидат технических наук
Артюхина Лидия Викторовна

Ведущая организация: - Омский государственный технический
университет (ОмГТУ), г. Омск

Защита состоится "23" декабря 2008 г. в 15⁰⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.09 в Томском политехническом университете по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан "18" ноября 2008 года.

Ученый секретарь совета,
к.т.н., доцент

Винокуров Б.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Перед российскими производителями медицинской техники и средств диагностики в настоящее время остро стоит задача создания конкурентоспособной отечественной продукции, превышающей технико-экономические и потребительские показатели аналогичной продукции зарубежного производства.

Все более широко в медицине применяются электрофизиологические методы исследования функционального состояния организма человека как в целом, так и отдельных органов.

Одной из наиболее распространенных методик оценки состояния биообъекта и его параметров в биологии и медицине является измерение его электрических характеристик: биопотенциалов, биотоков, либо проводимостей тканей, органов, жидкостей биологического происхождения – биоэлектролитов.

С этой целью в качестве измерительных преобразователей широко используются биоэлектрические электроды – устройства съёма биопотенциалов, имеющие поверхность, контактирующую с биологическим объектом, и выходные элементы.

К настоящему времени создано большое количество биоэлектрических электродов, отличающихся физическими принципами работы, конструктивными решениями, техническими характеристиками, необходимостью использования дополнительных приемов и средств.

Независимо от типа биоэлектродов в них формируется при изготовлении либо при эксплуатации переход «электронная-ионная проводимость».

Достоверность результатов электрофизиологического исследования во многом зависит от качества электродов, их физико-химических свойств. Электроды контактируют с поверхностью тела человека и таким образом замыкают электрическую цепь между генератором биопотенциалов и измерительным устройством. В настоящее время для чрескожной регистрации биопотенциалов используют электроды из различных материалов (нержавеющая сталь, никром, серебро, золото, углеграфит и т.д.).

Качество и достоверность регистрируемой информации также зависят от параметров электродов: электродного потенциала, напряжения поляризации,

напряжения шума, полного электродного сопротивления, геометрических размеров электродов и т.д.

Биоэлектрические сигналы, регистрируемые при диагностике различных органов и тканей человека, занимают диапазон от единиц нановольт до десятков милливольт по амплитуде и от 0 Гц до 20 кГц по частоте. Эти обстоятельства определяют довольно жесткие требования к электродам по минимизации потерь полезного сигнала, которые необходимо учитывать при разработке электродов.

Естественно, что проблема разработки электродов с более высокими метрологическими характеристиками связана с необходимостью создания современного испытательного оборудования для проверки параметров электродов.

Таким образом, необходимость улучшения метрологических параметров электродов приводит к необходимости создания более совершенной испытательной аппаратуры для их проверки в процессе научных исследований и для производства при проведении приемо-сдаточных и периодических испытаний электродов.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с планами работ НИИ интроскопии ГОУ ВПО Томский политехнический университет, а также по проектам:

1. «Проведение опытно-конструкторских, технологических и экспериментальных работ по созданию промышленной технологии массового производства одноразовых хлор-серебряных электродов на базе пористой керамики», программа Рособразования «Развитие научного потенциала высшей школы», 2005 г.

2. Грант ТПУ для молодых ученых и аспирантов, 2005 г.

3. «Разработка автоматизированных средств измерения и контроля метрологических характеристик медицинских одноразовых ЭКГ-электродов на базе пористой керамики», грант Администрации Томской области на 2005-2006 гг.

4. Проект РФФИ № 08-08-99069 «Разработка научных основ формирования малощумящего высокостабильного неполяризующегося

перехода «электронная-ионная проводимость» на базе пористой керамики», 2008 г.

Цель работы. Разработка автоматизированной аппаратуры для проверки метрологических характеристик медицинских электродов, изготовленных на основе различных технологий, создание и экспериментальные исследования медицинских наноэлектродов, разработанных на основе современных нанотехнологий и наноматериалов, исследование и физическое моделирование электрических процессов, протекающих в электродах.

Основными задачами, решаемыми в диссертационной работе в связи с поставленной целью, являются следующие:

- Обобщение имеющихся типов медицинских электродов, технологий их изготовления и уровня метрологического обеспечения данной проблемы.
- Разработка метрологического оборудования с повышенной разрешающей способностью для оценки собственной электрической активности перехода «электронная-ионная проводимость».
- Создание и экспериментальные исследования медицинских наноэлектродов, основанных на применении современных нанотехнологий и наноматериалов, с более высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками.
- Экспериментальные исследования медицинских электродов, созданных на основе различных технологий.
- Разработка физической модели электрода на основании проведенных экспериментальных исследований.

Методы исследований: теоретико-экспериментальные, основанные на общих принципах построения электронной измерительной и медицинской аппаратуры, прикладной и вычислительной математике, прикладных программ для персонального компьютера, технологиях математического и физического моделирования и проведения экспериментов.

Достоверность и обоснованность. Все выводы, полученные в результате теоретических исследований и математического моделирования, проверены и подтверждены путем экспериментальных исследований.

Научная новизна:

➤ Впервые разработано и успешно прошло испытания в Томском центре стандартизации и метрологии автоматизированное метрологическое оборудование для проверки медицинских электродов по ГОСТ 25995-83 с повышенной разрешающей способностью, позволяющее измерять и оценивать размах собственного дрейфа напряжения электродов и собственного напряжения шума электродов порядка единиц нановольт на фоне шумов измерительной аппаратуры микровольтового уровня.

➤ Впервые получены результаты оценки собственного дрейфа и собственного напряжения шума электродов, изготовленных с помощью различных технологий, в частотных диапазонах в соответствии с ГОСТ 25995-83.

➤ Впервые разработаны и экспериментально исследованы лабораторные образцы медицинских наноэлектродов, созданных на основе современных нанотехнологий и наноматериалов.

➤ Экспериментально доказано, что хлор-серебряные электроды на базе пористой керамики имеют значительно меньшие шумы по сравнению с хлор-серебряными электродами зарубежного производства, наименьший уровень шумов имеют наноэлектроды.

➤ На основании сравнительных экспериментальных исследований разработана физическая модель хлор-серебряного электрода на базе пористой керамики.

Практическая ценность и внедрение:

➤ Практическая ценность исследований состоит в разработке принципов построения информационно-измерительной аппаратуры для оценки собственных шумов первичного преобразователя (электрода), которые могут быть использованы и в других областях измерительной техники для оценки шумов радиокомпонентов (микросхем, резисторов, конденсаторов), а также различных измерительных преобразователей с целью оценки качества технологии их изготовления.

➤ Созданы первые лабораторные образцы медицинских нанозлектродов, метрологические параметры которых на порядок или в несколько раз превышают параметры существующих электродов.

Полученные результаты внедрены в производство медицинских хлор-серебряных электродов на базе пористой керамики в НИИ интроскопии ГОУ ВПО Томский политехнический университет.

Разработанные методы исследования собственных шумов измерительных преобразователей внедрены в учебный курс «Преобразование измерительных сигналов» для студентов специальности 200106 «Информационно-измерительная техника и технологии» в ГОУ ВПО Томский политехнический университет.

Личный вклад автора. Основные научные теоретические и экспериментальные исследования, макетирование выполнены автором самостоятельно либо при его непосредственном участии.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Открытой окружной конференции молодых ученых «Наука и инновации XXI века». – Сургут, 2003; 10-ой Юбилейной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск, 2004; 22-ой Уральской конференции «Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами». – Челябинск, 2004; Открытой окружной конференции молодых ученых «Наука и инновации XXI века». – Сургут, 2004; Международной научно-практической конференции «Современная техника и технологии в медицине, биологии и экологии». – Новочеркасск, 2006; Международной научно-практической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика». – Томск, 2008; Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в медицине». – Китай, Пекин, 2008.

Публикации.

Основное содержание работы изложено в 8 опубликованных статьях и докладах [1-4, 6-9], в описании заявки на патент на изобретение (приоритетная справка) [10].

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего 77 библиографических ссылок, содержит 124 страницы основного машинописного текста, 41 рисунок и 5 таблиц.

Положения, выносимые на защиту:

➤ Способ измерения и оценки размаха собственных шумов медицинских хлор-серебряных электродов нановольтового уровня на фоне шумов измерительной аппаратуры микровольтового уровня.

➤ Экспериментально доказано, что нанoeлектроды имеют на порядок меньше дрейф электродного потенциала на постоянном токе, в несколько раз меньший импеданс, уровень собственного дрейфа напряжения и напряжения шума, имеют значительно меньшую емкость, степень поляризации при воздействии постоянным током по сравнению с известными хлор-серебряными электродами отечественного и зарубежного производства.

➤ Физическая модель электрода, которая отражает электрическую активность перехода «электронная-ионная проводимость» в зависимости от количества частиц серебра в порах керамической диафрагмы и их размера.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, поставлена цель и обозначены задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена рассмотрению вопросов электрофизиологии, электрическому проявлению жизнедеятельности клеток, тканей и органов, теории возникновения биопотенциалов. В ней также проведен обзор существующих электродов для отведения биопотенциалов и технологий их изготовления, приведена их классификация по различным признакам, рассмотрены достоинства и недостатки разновидностей электродов,

основные метрологические характеристики электродов и существующие методы испытаний.

Во второй главе рассмотрены основные эксплуатационные характеристики и артефакты электродов и определены основные требования к электродам, составлены эквивалентные схемы кожно-электродного контакта различных типов электродов, приведена общая схема расчета эквивалентной схемы электродной цепи для отведения биопотенциалов.

В третьей главе дано описание автоматизированной установки для метрологической проверки хлор-серебряных электродов. Приведены описание и принцип работы: назначение, область применения, технические характеристики, описание структурной схемы, описание режимов работы, описание программного обеспечения.

Установка для проверки хлор-серебряных электродов автоматизированная УПЭ-2 предназначена для измерений напряжения постоянного и переменного тока на электродной ячейке и определения технических параметров хлор-серебряных электродов. Установка позволяет измерять основные параметры электродов по ГОСТ 25995-83: разность электродных потенциалов; дрейф разности электродных потенциалов; напряжение шума; шум движения (электрохимический шум); полное сопротивление электродов; напряжение поляризации.

В установке предусмотрено углубленное исследование собственного дрейфа напряжения и собственного напряжения шума медицинских электродов в различных частотных диапазонах. Погрешность вычислений находится в пределах $\pm 1,3 \cdot 10^{-8} \%$, что позволяет оценивать собственный дрейф напряжения и напряжение шума электродов значением порядка единиц нВ.

Установка может быть применена для испытаний хлор-серебряных электродов в различных отраслях промышленности.

Установка является средством измерений по ГОСТ 22261-94 и представляет собой прибор настольного типа (рис. 1).

Конструктивно состоит из двух основных частей:

- измерительный блок, включающий модуль сбора данных (МСД) и выносную экранированную камеру;
- персональный компьютер.

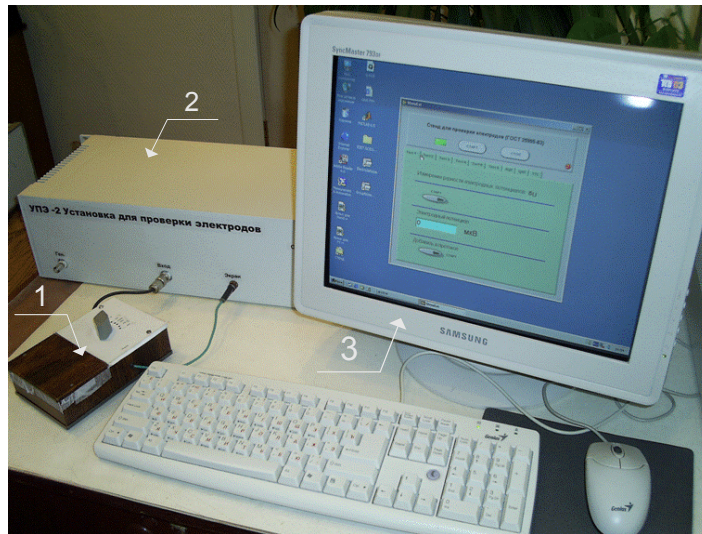


Рис. 1. Общий вид установки для проверки электродов УПЭ-2

(1 – выносная экранированная камера; 2 – измерительный блок; 3 – ПК)

Функциональная схема установки приведена на рис. 2.

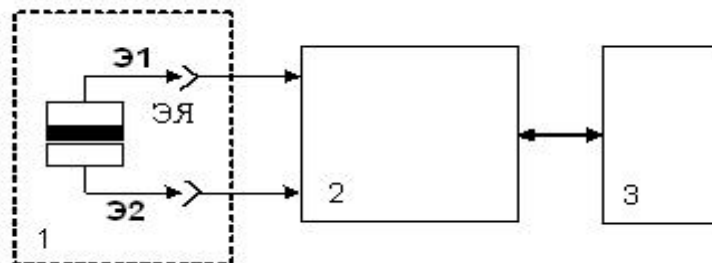


Рис. 2. 1 – выносная экранированная камера; 2 – измерительный блок; 3 – персональный компьютер

Проверяемые электроды Э1 и Э2 в совокупности образуют электродную ячейку (ЭЯ), представляющую собой систему «электрод-электролит-электрод», которая помещается в выносную экранированную камеру для защиты от электромагнитных помех.

Измерительный блок (2) представляет собой модуль сбора данных (МСД), которые передаются в персональный компьютер (3) и затем обрабатываются с помощью специально разработанного математического и программного обеспечения.

Основные функции автоматизации и обработки результатов измерений в установке осуществляются при помощи персонального компьютера, который производит сбор данных через каналы АЦП модуля МСД и переключение режимов работы установки.

В зависимости от измеряемого параметра электродов и заданного режима работы МСД изменяет конфигурацию измерительного канала (ИК). Сигналы, формируемые измерительным каналом, поступают на плату сбора данных, которая может усиливать сигнал встроенным усилителем, и по USB интерфейсу передаются на ПК.

В персональном компьютере по соответствующей программе результаты измерений обрабатываются. Предусмотрена возможность автоматического создания протокола испытаний.

Режимы работы установки следующие: измерение разности электродных потенциалов δU (Тест 1, Тест 4); измерение дрейфа разности электродных потенциалов (дрейфа напряжения электродов) U_v (Тест 2); измерение напряжения шума электродов U_T (Тест 3); измерение напряжения электромеханического шума U_S (Тест 2); измерение полного сопротивления электродов Z (Тест 5); измерение напряжения поляризации электродов U_P (Тест 6); измерение и оценка путем вычислений мгновенных значений собственного дрейфа напряжения и собственного напряжения шума электродов.

Измерение и оценка путем вычислений мгновенных значений собственного дрейфа напряжения и собственного напряжения шума электродов: в данном случае измерение размаха собственных шумов S медицинских электродов для съема поверхностных биопотенциалов проводится в присутствии шума N измерительной системы, значительно превышающего измеряемый, т.е. при отношении $S/N < 1,0$.

Предварительные исследования суммарного шума электродной ячейки, состоящей из слабополяризующихся хлор-серебряных электродов на базе пористой керамики, и измерительной аппаратуры, шума измерительной аппаратуры, измеренного при закороченном входе, показали, что полученные обе случайные реализации неокрашены, близки к нормальному распределению,

при этом суммарный шум статистически незначимо превышает уровень шума системы с короткозамкнутым входом.

Таким образом, оценка собственных шумов электрода в виде разности статистических параметров суммарного шума с электродной ячейкой и шума измерительной аппаратуры при закороченном входе является несостоятельной.

Однако при вычислении значений энергий и мощностей шума в различных частотных диапазонах получены незначительные, но устойчивые отклонения значений энергий и мощностей для реализаций шума одной электродной ячейки, так и для различных электродных ячеек, по отношению к шуму измерительной аппаратуры при закороченном входе.

Для оценки собственных шумов электродов предложена следующая информационно-измерительная технология:

1. Регистрация суммарных шумов измерительной аппаратуры и электродной ячейки;
2. Регистрация шума измерительной аппаратуры при закороченном входе;
3. Проверка законов распределения;
4. Определение спектров с помощью метода быстрого преобразования Фурье (БПФ);
5. Формирование частотных интервалов для суммарных шумов и шума измерительной аппаратуры с равномерным распределением по частоте;
6. Вычисление энергий и мощностей в заданных частотных интервалах;
7. Определение коэффициентов для шума измерительной аппаратуры, выравнивающих с заданной точностью значения энергий и мощностей суммарного шума и шума измерительной аппаратуры в заданных частотных интервалах в частотной области;
8. Формирование с помощью найденных коэффициентов дополнительного шумового сигнала в частотной области из шума измерительной аппаратуры;
9. Суммирование дополнительного шума с шумом измерительной аппаратуры в частотной области;

10. Сравнение энергий и мощностей в заданных частотных интервалах измеренного суммарного шума и суммы шума измерительной аппаратуры и дополнительного шума;

11. При достижении заданной точности получение временной функции путем проведения обратного преобразования Фурье для дополнительного шума;

12. Измерение отклонения от максимума до минимума полученной временной функции;

13. При неудовлетворительной точности измерения повторяют с другими коэффициентами.

Вычисление собственного дрейфа напряжения и собственного напряжения шума ЭЯ в частотных диапазонах по ГОСТ 25995 осуществляют с помощью специально разработанных программ обработки сигналов «Шумы электродов» и «Характеристики группы шумов».

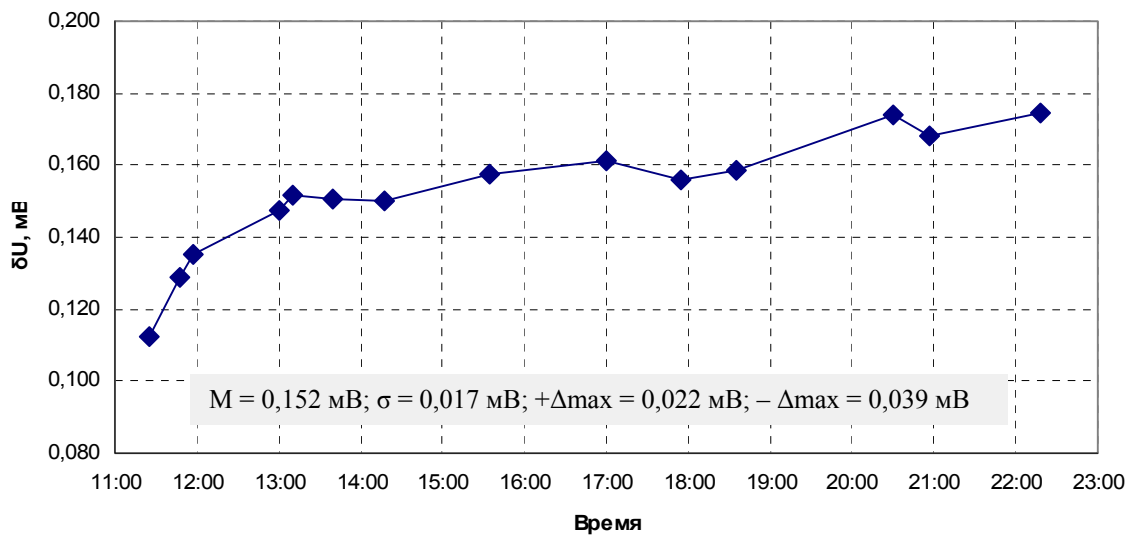
Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям характеристик хлор-серебряных электродов, изготовленных на основе различных технологий, приведены результаты измерения дрейфа электродных потенциалов на постоянном токе, полного сопротивления электродов, напряжения поляризации, собственного дрейфа напряжения и собственного напряжения шума электродов.

Рассматриваются результаты экспериментальных исследований метрологических характеристик трех электродных ячеек: ЭЯ₁ – пара одноразовых хлор-серебряных электродов итальянского производства, выполненных по традиционной технологии путем нанесения чувствительного слоя Ag-AgCl на сплошную подложку; ЭЯ₂ – пара хлор-серебряных электродов, выполненных на базе пористой керамики производства Томского политехнического университета, Россия; ЭЯ₃ – пара нанoeлектродов, выполненных с применением современных нанотехнологий, производства Томского политехнического университета, Россия.

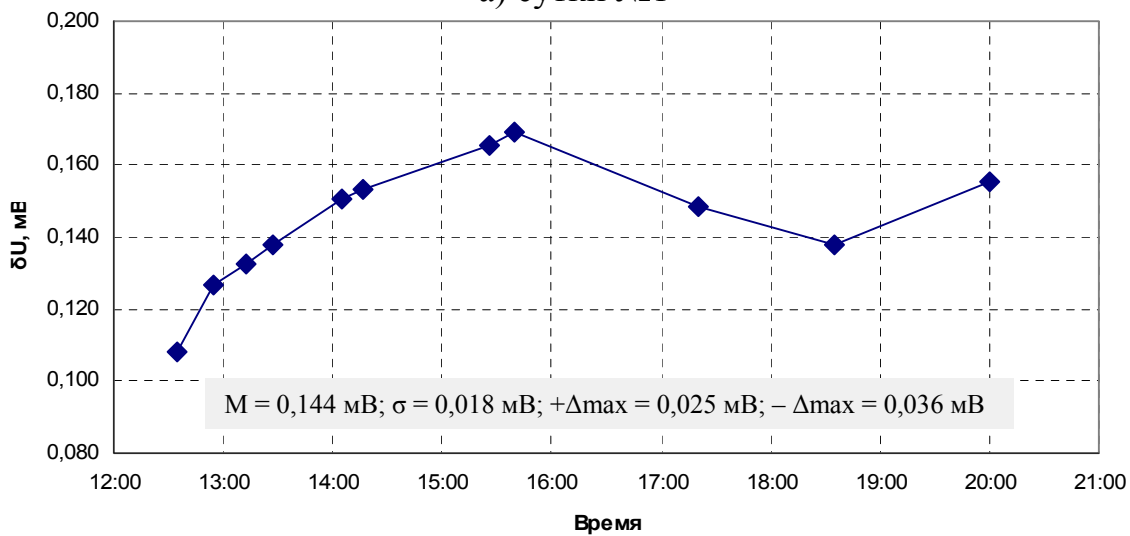
Экспериментальные исследования проводились на 10 парах каждого вида ЭЯ₁, ЭЯ₂, ЭЯ₃, причем для каждой пары эксперименты повторялись по 10 раз. На графиках показаны результаты с максимальными значениями исследуемых параметров.

1) Определение дрейфа разности электродных потенциалов на постоянном токе проводили для пары нанoeлектродов ЭЯ₃ с помощью аналоговой установки для проверки медицинских электродов УПЭ-1.

Разность потенциалов электродной ячейки (δU) на постоянном токе измерялась через некоторые промежутки времени несколько раз в день на протяжении 10 суток. На рис.3 приведены результаты исследования в течение первых двух суток, на рис.4 – средние значения за сутки в течение 10 суток.



а) сутки №1



б) сутки №2

Рис. 3. Изменение электродного потенциала в течение суток

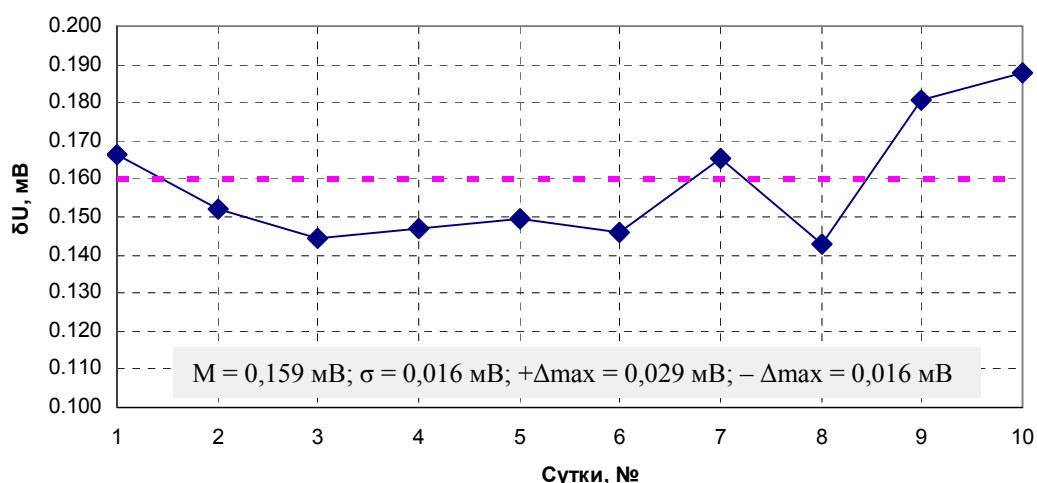


Рис. 4. Электродный потенциал в зависимости от времени

На графиках (рис. 3, 4) вычислены также математическое ожидание электродного потенциала (M), его дисперсия (σ), максимальное отклонение от среднего в положительную сторону ($+\Delta_{\max}$) и в отрицательную сторону ($-\Delta_{\max}$).

Математическое ожидание электродного потенциала находим по формуле:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N \delta U_i}{N}, \quad (1)$$

где δU_i – текущее значение величины δU , N – число отсчетов.

Тогда дисперсию значений электродного потенциала вычислим как:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta U_i - M)^2}{N - 1}}. \quad (2)$$

При исследовании наноэлектродов получены следующие результаты:

➤ Максимальные отклонения постоянного потенциала электродной ячейки относительно среднего значения не превышают ± 30 мкВ.

➤ Дрейф разности электродного потенциала на постоянном токе менее 0,005 мкВ/с, т.е. на порядок меньше дрейфа разности электродного потенциала на постоянном токе электродов на базе пористой керамики.

2) Напряжение поляризации электродных ячеек ЭЯ₁, ЭЯ₂ и ЭЯ₃ исследовалось на установке УПЭ-1 в двух режимах:

- при воздействии постоянными токами 0,1 мкА и 0,5 мкА;

- при воздействии постоянными токами 1 мкА, 2 мкА, 3 мкА, 5 мкА, 10 мкА.

Результаты исследований представлены на рис. 5 и 6.

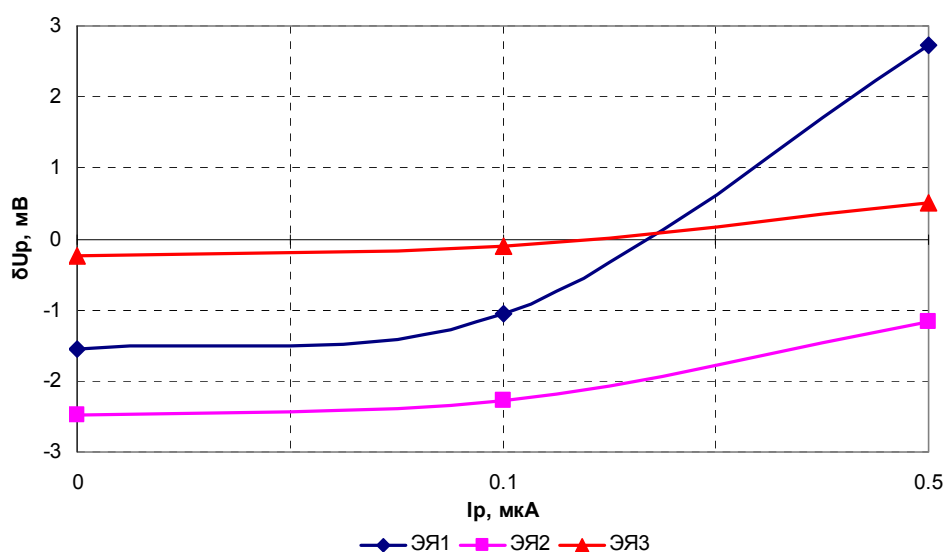


Рис. 5. Напряжение поляризации электродов U_p в зависимости от величины тока I_p

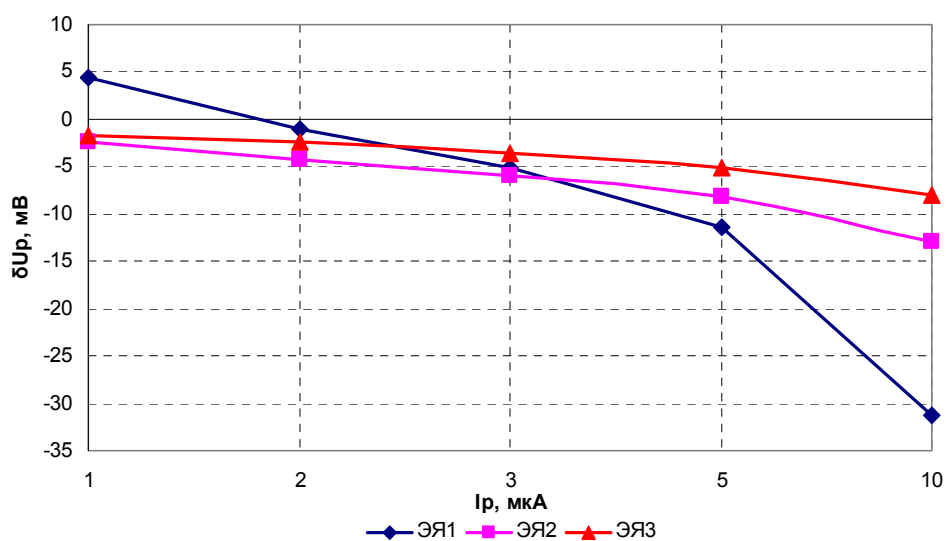


Рис. 6. Напряжение поляризации электродов U_p в зависимости от величины тока I_p

Как видно из результатов экспериментальных исследований, наименьшее напряжение поляризации под воздействием постоянного тока имеют электроды с наночастицами ЭЯ₃, которые при токах $\leq 0,5$ мкА практически не поляризуются. Ячейка ЭЯ₁ – электроды итальянского производства

поляризуются под воздействием постоянного тока значительно эффективнее, чем электроды на базе пористой керамики и наноэлектроды.

3) По результатам экспериментальных исследований полного сопротивления ячеек ЭЯ₁, ЭЯ₂, ЭЯ₃, которое измерялось в диапазоне частот от 0,001 Гц до 10 МГц при значениях тока 1 мкА, 5 мкА, 10 мкА, можно сделать следующие выводы:

➤ Хлор-серебряные электроды одноразового применения имеют сопротивление до 2,5 кОм на частоте 0,001 Гц и токе 1 мкА, в диапазоне частот от 0,1 Гц до 500000 Гц – 1000 ÷ 1300 Ом. Граничная частота, на которой импеданс электрода стремится к нулю, равна 1 МГц.

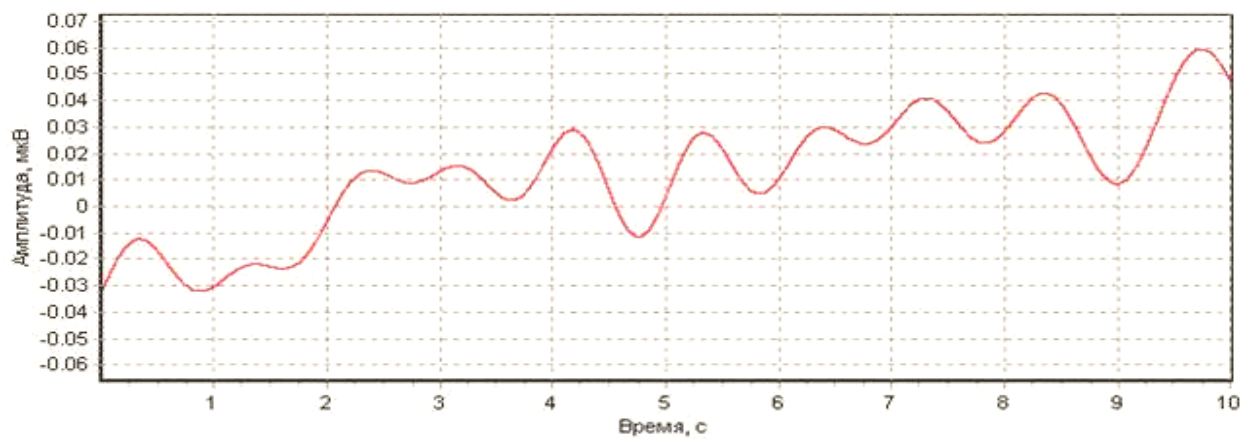
➤ Хлор-серебряные электроды на базе пористой керамики имеют сопротивление до 1,75 кОм на частоте 0,001 Гц и токе 1 мкА, в диапазоне частот от 0,1 Гц до 3,0 МГц – 250 ÷ 350 Ом. Граничная частота, на которой импеданс электрода стремится к нулю, равна 3,5 МГц.

➤ Наноэлектроды имеют сопротивление до 1,2 кОм на частоте 0,001 Гц и токе 1 мкА, в диапазоне частот от 0,1 Гц до 8,5 МГц – 100 ÷ 200 Ом. Граничная частота, на которой импеданс электрода стремится к нулю, равна 8,5 МГц.

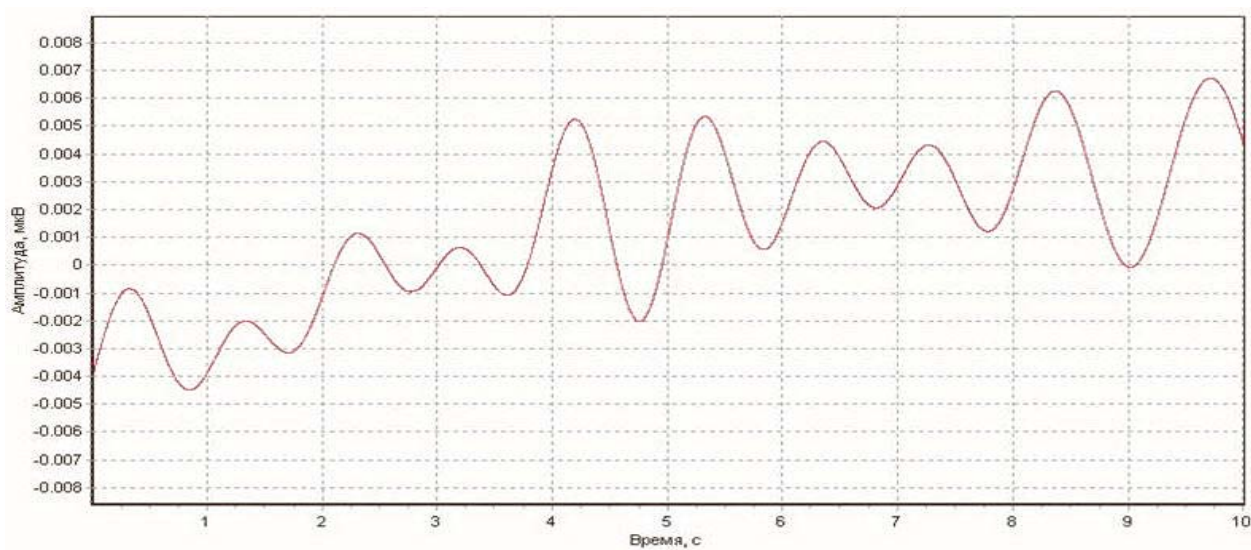
Таким образом, наноэлектроды, в поры которых с помощью специальной технологии нанесены наночастицы серебра размером $\leq 0,1$ мкм, имеют самую высокую граничную частоту 8,5 МГц, а следовательно, и минимальную емкость.

Проведенные эксперименты позволили сделать вывод о том, что с уменьшением размера частиц серебра уменьшается емкость электрода C_3 , сопротивление R_3 , повышается стабильность электродного потенциала во времени, уменьшается степень поляризации при воздействии постоянным током.

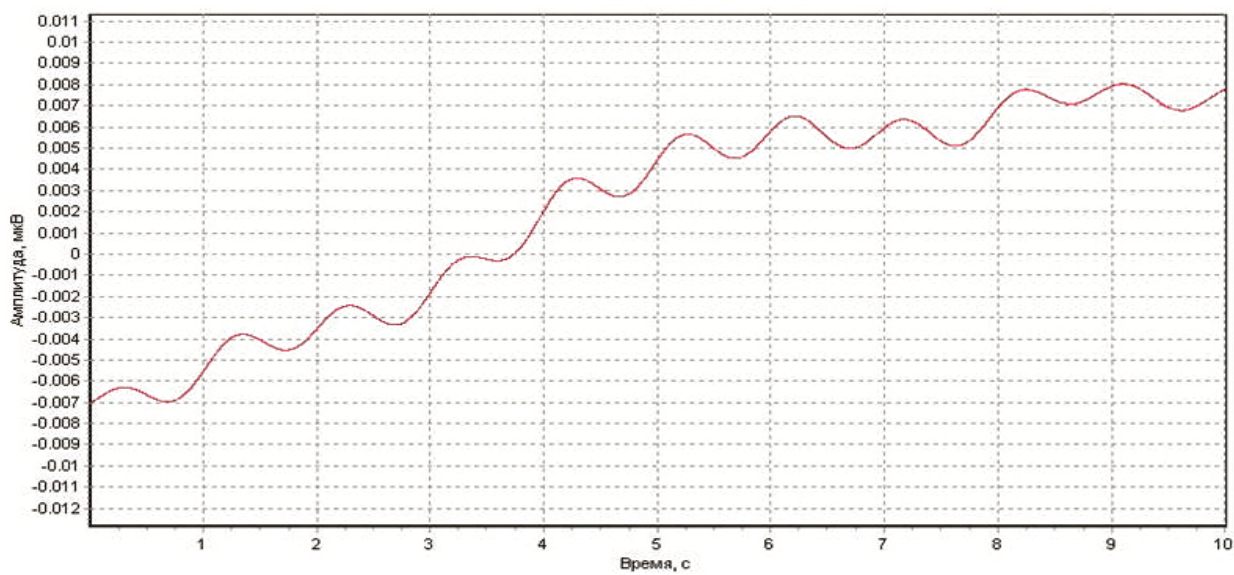
4) На установке УПЭ-2 были проведены исследования собственного дрейфа напряжения и собственного напряжения шума электродных ячеек ЭЯ₁, ЭЯ₂, ЭЯ₃. Результаты исследований представлены на рис. 7-9.



а) ЭЯ₁

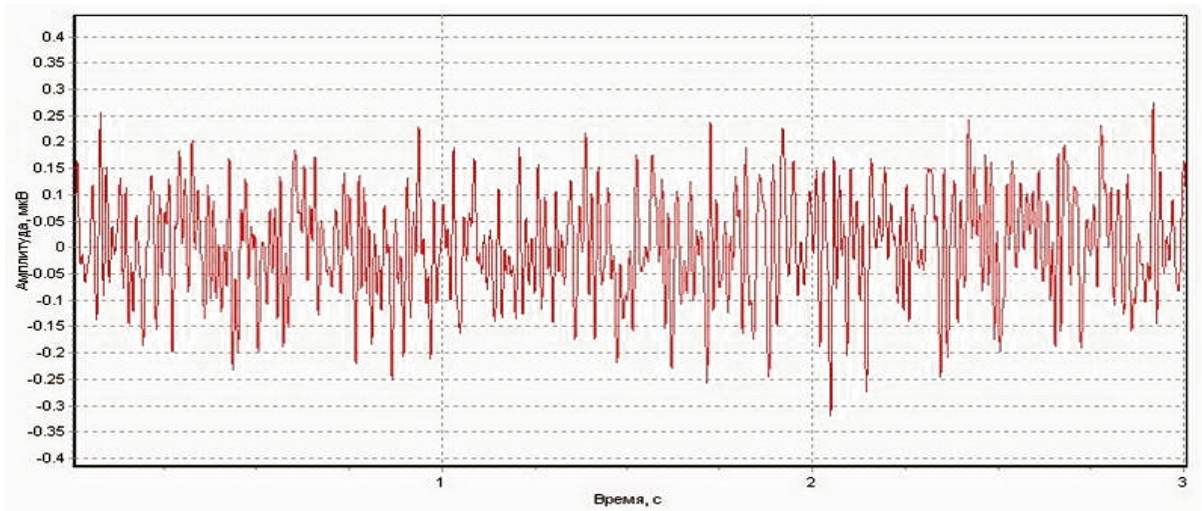


б) ЭЯ₂

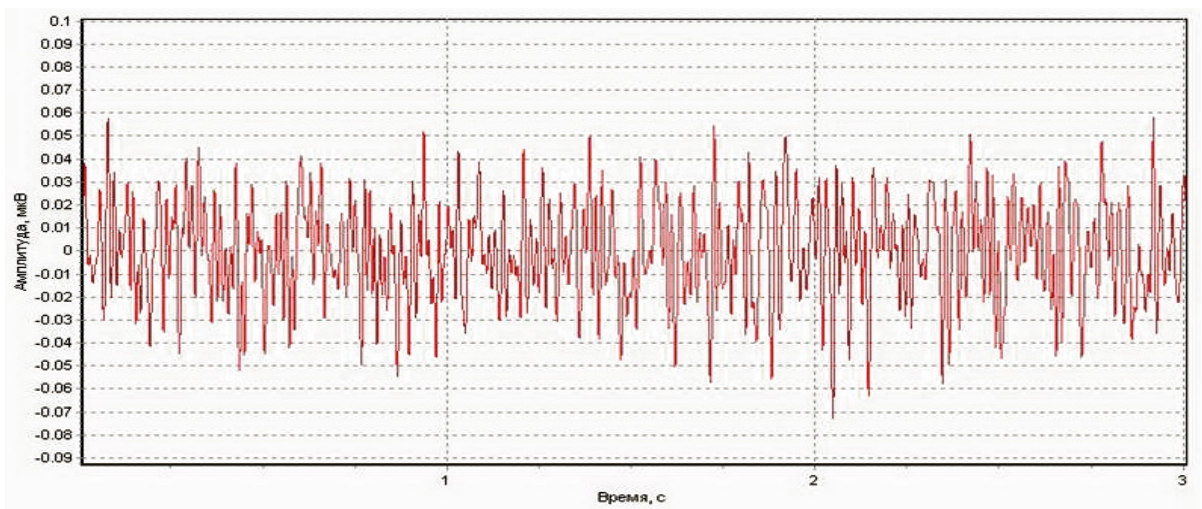


в) ЭЯ₃

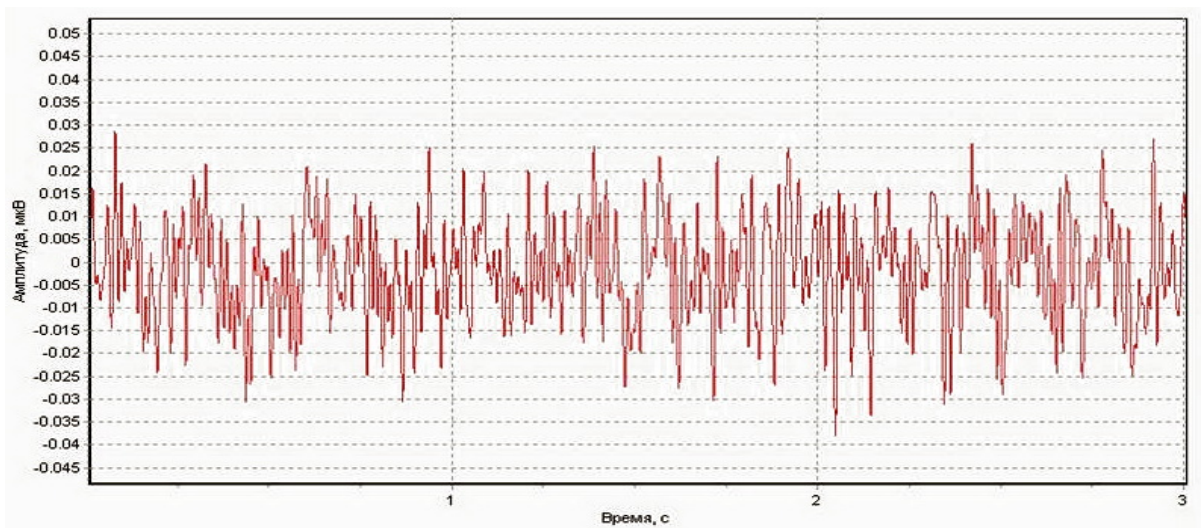
Рис. 7. Собственный дрейф напряжения электродов
в диапазоне частот (0,01 – 1) Гц



а) ЭЯ₁

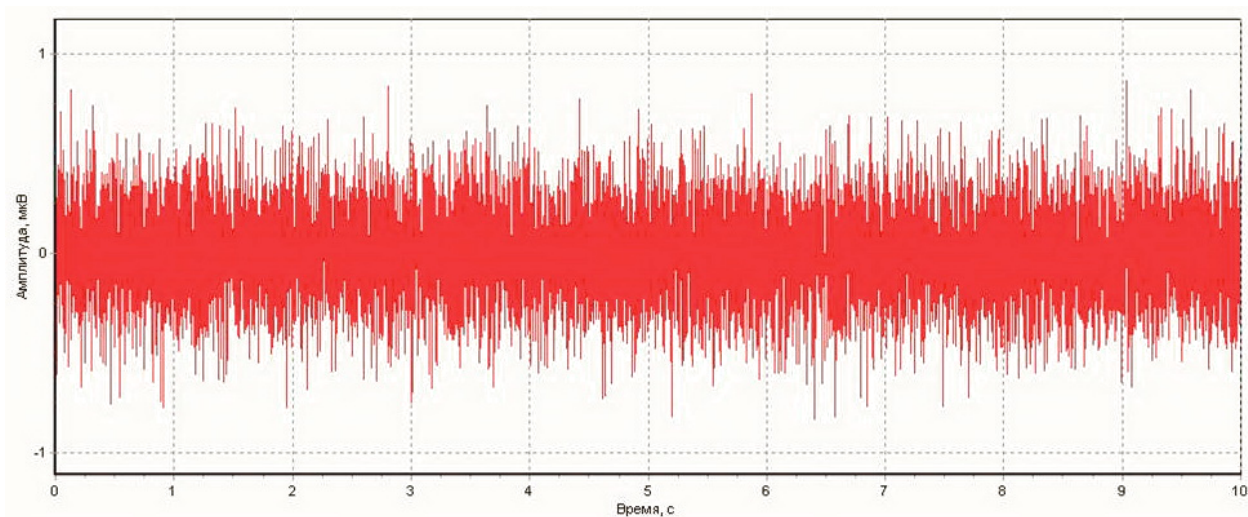


б) ЭЯ₂

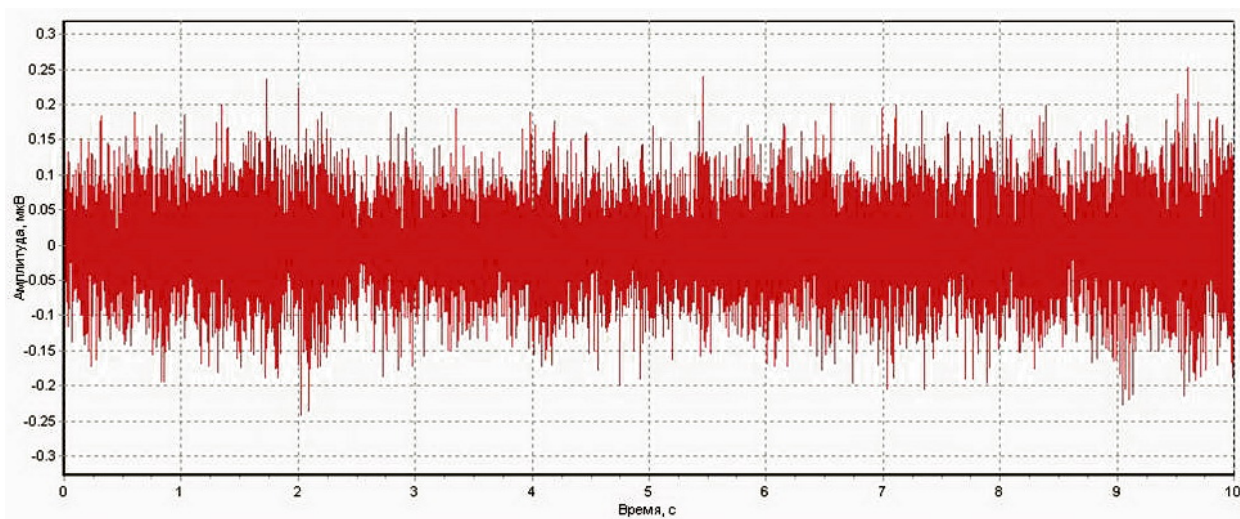


в) ЭЯ₃

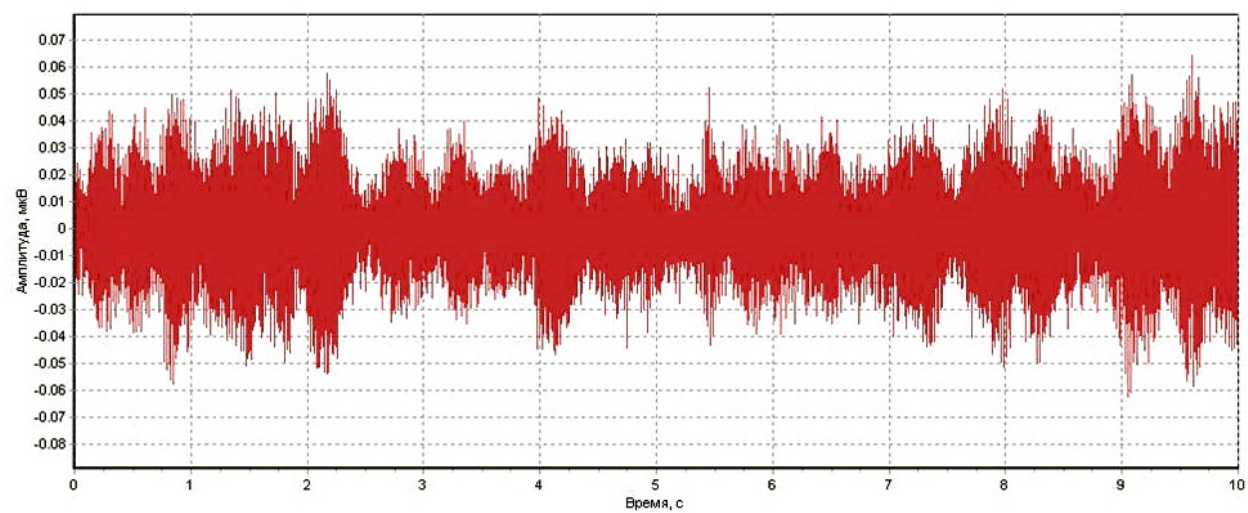
Рис. 8. Собственное напряжение шума электродов
в диапазоне частот (0,05 – 75) Гц



а) ЭЯ₁



б) ЭЯ₂



в) ЭЯ₃

Рис. 9. Собственное напряжение шума электродов
в диапазоне частот (1 – 500) Гц

По результатам экспериментальных исследований собственного дрейфа напряжения и напряжения шума электродов в различных частотных диапазонах можно сделать следующие выводы:

➤ Размах флуктуаций собственного дрейфа напряжения в диапазоне (0,01 – 1) Гц для ячейки ЭЯ₁ равен (–10 нВ ÷ +20 нВ); для ячейки ЭЯ₂ – (–2 нВ ÷ +4 нВ); для ячейки ЭЯ₃ – (–1 нВ ÷ +1 нВ).

➤ Размах собственного напряжения шума электродов в диапазоне (0,05 – 75) Гц для ячейки ЭЯ₁ равен (–300 нВ ÷ +60 нВ); для ячейки ЭЯ₂ – (–60 нВ ÷ +60 нВ); для ячейки ЭЯ₃ – (–35 нВ ÷ +30 нВ).

➤ Размах собственного напряжения шума электродов в диапазоне (1 – 500) Гц для ячейки ЭЯ₁ равен (–600 нВ ÷ +600 нВ); для ячейки ЭЯ₂ – (–200 нВ ÷ +200 нВ); для ячейки ЭЯ₃ – (–60 нВ ÷ +60 нВ).

Как видно из полученных экспериментальных исследований, наименьший размах собственного дрейфа напряжения и собственного напряжения шума имеют наноэлектроды.

Также разработана физическая модель электрода, основанная на результатах экспериментальных исследований.

При изготовлении электродов на базе пористой керамики в поры керамической диафрагмы электрода размещают частицы серебра. Паста на основе хлористого серебра (AgCl) после расплавления смачивает серебряные частицы, при этом образуется множество хлор-серебряных микроэлектродов в порах керамической диафрагмы. Поры в пористой керамике являются сложной системой сообщающихся между собой полостей.

Частицы серебра электрически не связаны друг с другом, т.е. находятся в разных порах. После пропитки электродов твердым электролитом между отдельными микроэлектродами возникает электрическая проводимость. Общая ЭДС (электродный потенциал) определяется суммой потенциалов микроэлектродов:

$$\bar{A} = \frac{\sum \Delta A_i}{N}, \quad [3]$$

где E_i – электродный потенциал отдельного микроэлектрода, N – число микроэлектродов.

В связи с этим электроды на базе пористой керамики можно назвать полиэлектродами.

В нанoeлектродах увеличивается объем, заполненный частицами серебра благодаря специальной технологии нанесения наночастиц в поры керамической диафрагмы, что приводит к значительному увеличению количества микроэлектродов.

С увеличением числа микроэлектродов уменьшается уровень шумов, что видно из зависимостей, приведенных на рис. 7 – 9.

Уменьшение уровня шумов с уменьшением размера частицы серебра не связано с увеличением емкости электрода C_z , так как экспериментальные исследования показали, что емкость нанoeлектродов значительно меньше емкости электродов на базе пористой керамики и электродов итальянского производства. Наибольший уровень шумов и наибольшую емкость имеют хлор-серебряные электроды итальянского производства, в которых чувствительный слой $Ag-AgCl$ нанесен на сплошную подложку, и который является моноэлектродом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе описаны типы существующих электродов и методы исследования метрологических параметров электродов; рассмотрены основные эксплуатационные характеристики электродов, эквивалентные схемы кожно-электродного контакта различных типов электродов, артефакты и шумы электродов; дано описание установки для проверки медицинских хлор-серебряных электродов автоматизированной УПЭ-2; способа измерения и оценки размаха собственного дрейфа напряжения и собственного напряжения шума электродов; приведены результаты исследования метрологических характеристик электродов, изготовленных с помощью различных технологий.

Основные результаты исследований, проведенных в диссертации, сводятся к следующему:

➤ На основании аналитического обзора существующих типов электродов показана необходимость в дальнейшем повышении метрологических характеристик электродов и расширении частотного диапазона в область инфранизких частот вплоть до постоянного тока.

➤ Показано, что эксплуатационные параметры электродов зависят от конструкции электродов, технологии их изготовления, а также свойств применяемых материалов.

➤ Показано, что собственный дрейф напряжения электродов и напряжение шума электродов определяется дискретной природой носителей заряда (ионов и электронов), а также тепловым движением носителей заряда.

➤ Установлено, что уменьшить собственный дрейф напряжения и напряжение шума электродов можно путем совершенствования технологии изготовления электродов и их конструкции.

➤ Разработана установка для проверки медицинских хлор-серебряных электродов автоматизированная УПЭ-2. Установка прошла успешные испытания в Томском центре стандартизации и метрологии.

➤ Разработанная процедура измерения и оценки собственного дрейфа напряжения и собственного напряжения шума электродов позволили измерять и оценивать размах случайных шумов на уровне 1 нВ и выше.

➤ Экспериментально доказано, что хлор-серебряные электроды на базе пористой керамики имеют более высокие метрологические характеристики по сравнению с хлор-серебряными электродами зарубежного производства.

➤ Нанoeлектроды, изготовленные с применением наночастиц серебра, имеют более высокие метрологические характеристики по сравнению с обычными хлор-серебряными электродами на базе пористой керамики.

➤ Пористые электроды (обычные и нанoeлектроды) состоят из многочисленных микроэлектродов и поэтому имеют более высокие

метрологические характеристики по сравнению с электродами зарубежного производства.

Наиболее перспективными для дальнейшего применения в медицине и создания новейшей электродиагностической аппаратуры с повышенной разрешающей способностью являются нанoeлектроды.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Авдеева Д.К., Вылегжанин О.Н., Грехов И.С., Казаков В.Ю., Ким В.Л., Клубович И.А., Рыбалка С.А., Садовников Ю.Г., Якимов Е.В. Автоматизированный испытательный стенд для метрологической проверки медицинских хлор-серебряных электродов на базе пористой керамики // Известия ТПУ. – 2008. – №2, том 312. – С. 353-357.
2. Авдеева Д.К., Красильников Ю.И., Щукин Н.В., Грехов И.С., Сашина А.С. Измерительная аппаратура для неинвазивного измерения амплитуды и фазы микрофонного потенциала улитки органа слуха с мочки уха человека // Современная техника и технологии в медицине, биологии и экологии: Материалы VI Междунар. научно-практ. конф. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005. – С. 9-13.
3. Авдеева Д.К., Садовников Ю.Г., Якимов Е.В., Ким В.Л., Грехов И.С., Сашина А.С. Автоматизированный испытательный стенд для проверки медицинских слабополяризующихся хлор-серебряных электродов // Современная техника и технологии в медицине, биологии и экологии: Материалы VI Междунар. научно-практ. конф. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005. – С. 32-34.
4. Авдеева Д.К., Садовников Ю.Г., Якимов Е.В., Ким В.Л., Грехов И.С., Сашина А.С. Результаты исследования дрейфа напряжения и напряжения шума медицинских слабополяризующихся хлор-серебряных электродов на базе пористой керамики // Современная техника и технологии в медицине, биологии и экологии: Материалы VI Междунар. научно-практ. конф. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005. – С.29-32.

5. Авдеева Д.К., Вылегжанин О.Н., Грехов И.С., Казаков В.Ю., Ким В.Л., Клубович И.А., Рыбалка С.А., Садовников Ю.Г., Юхин Ю.М. Результаты экспериментальных исследований электрической активности перехода «электронная-ионная проводимость» // Фундаментальные и прикладные исследования в медицине: Материалы Международной конференции. – Китай, Пекин, 2008.

6. Грехов И.С., Сашина А.С. Аппаратура для проверки хлор-серебряных электродов для медицинских и геофизических исследований // Наука и инновации XXI века: Труды Открытой окружной конференции молодых ученых. – Сургут, 2005. – С. 39-40.

7. Грехов И.С., Авдеева Д.К., Орехов А.Н. Метрологическое обеспечение слабополяризующихся хлор-серебряных электродов для геофизических исследований // Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами: тезисы 22-ой Уральской конференции. – Челябинск, 2004. – С. 9-10.

8. Грехов И.С., Авдеева Д.К. Разработка испытательного стенда для проверки медицинских хлор-серебряных электродов на базе пористой керамики: Труды 10-й Юбилейной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск, 2004. – С. 287-288.

9. Грехов И.С. Разработка малошумящего испытательного стенда для проверки медицинских хлор-серебряных электродов на базе пористой керамики // Наука и инновации XXI века: Труды Открытой окружной конференции молодых ученых. – Сургут, 2003. – С. 66-67.

10. Заявка на патент «Способ измерения размаха собственных шумов медицинских электродов для съема поверхностных биопотенциалов» / Авдеева Д.К., Вылегжанин О.Н., Грехов И.С., Клубович И.А., Рыбалка С.А., Садовников Ю.Г., Якимов Е.В. // Приоритетная справка №2008114573 от 14.04.2008 г.