

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Томский государственный архитектурно-
строительный университет»**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»**

на правах рукописи

Мингажева Юлия Газинуровна

**ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ВОДНЫХ СРЕД ПРИ ОБРАБОТКЕ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ НАНОСЕКУНДНЫМИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

Шифр и наименование специальности:

2.4.4 – Электротехнология и электрофизика

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук,

профессор

Волокитин Олег Геннадьевич

Научный консультант:

доктор технических наук,

профессор

Пак Александр Яковлевич

Томск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	11
1.1 Электролиз	12
1.2 Электрохимическая активация	13
1.3 Магнитная обработка.....	14
1.4 Радиоллиз	19
1.5 Сонолиз	21
1.6 Электрические разряды в воде	25
1.7 Наносекундные электромагнитные импульсы	31
1.7.1 Импульсная радиолизная модель	35
1.7.2 Импульсный разряд	37
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	41
2.1 Генераторы импульсов	41
2.2 Электродная система НЭМИ.....	49
2.3 Методики измерений.....	59
2.3.1 Определение характеристик раствора и концентрации веществ в нем	59
2.3.2 Определение концентрации драгоценных металлов в пульпе	60
2.3.3 Определение морфологического состава электрода и осадка в растворе после обработки	61
2.4 Измерение волнового сопротивления электродной системы.....	61
2.5 Измерение переходных характеристик электродной системы	66
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ НЭМИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ....	69
3.1 Обработка НЭМИ дистиллированной воды.....	70

3.2 Обработка НЭМИ питьевой воды	72
3.3 Обработка НЭМИ сточных вод	75
3.4 Обработка НЭМИ водных растворов с высокой концентрацией металлов	78
3.5. Обработка НЭМИ модельных растворов с разными концентрациями металлов	88
ГЛАВА 4. ВОЗДЕЙСТВИЕ НЭМИ НА ПУЛЬПУ ИЗ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ.....	91
4.1 Обработка НЭМИ пульпы из сульфидной золотосодержащей руды ПЗ-2 с добавлением NaCN.....	93
4.2 Обработка НЭМИ пульпы из сульфидной золотосодержащей руды ПЗ-2 и дистиллированной воды.....	96
4.3 Обработка НЭМИ пульпы из золотосодержащей руды ТЮК 4 и дистиллированной воды	98
4.4 Обработка НЭМИ пульпы из золотосодержащей руды ТЮК 3 с добавлением дистиллированной воды.....	101
4.6 Техническое описание установки УНИОЗР-01	110
ГЛАВА 5. ОБОБЩЕНИЕ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	114
5.1 Воздействие НЭМИ на водную среду	114
5.2 Воздействие НЭМИ на пульпу из золотосодержащей руды	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное) Акт внедрения результатов диссертационной работы в АО НПФ «Башкирская золотодобывающая компания».....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (справочное) Акт внедрения результатов диссертационной работы в ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет».....	145

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается рост интереса к электроразрядным технологиям в решении различных задач, в том числе обработки материалов, технических и питьевых вод и модельных растворов. Это можно проследить по значительному увеличению как патентной активности, так и научных публикаций в данной области. Хотя основное внимание исследователей сосредоточено на лабораторных испытаниях, но есть и примеры успешного внедрения в промышленное производство. Например, в России на протяжении нескольких лет успешно функционируют системы, работающие на основе импульсного барьерного разряда в водовоздушной среде, используемые для очистки и дезинфекции подземных вод. Результаты испытаний этих систем подтверждают их эффективность, однако в некоторых случаях возникают трудности с достижением необходимого уровня очистки. Удаление углеродных и органометаллических соединений представляет собой серьезную задачу, поскольку их концентрация в подземных источниках может достигать 10...20 мг/л.

Проблема электроимпульсной переработки золотосодержащих труднообогатяемых руд имеет большое значение, поскольку около 45 % всех запасов руды составляют именно трудноизвлекаемые месторождения с упорными сульфидными рудами. Извлечение мельчайших частиц на микро- и наноуровне из сульфидных руд, содержащих благородные металлы, представляет собой определённые трудности даже при использовании сверхтонкого помола вплоть до 30 мкм. Однако используемые традиционные методы оказываются экономически неэффективными и влекут высокие экологические риски, т. к. используемые реагенты часто токсичны и угрожают окружающей среде. Поэтому актуален поиск альтернативных подходов к обработке золотоносных руд. В последние годы внимание уделяется новым

энергетическим воздействиям, среди которых выделяются нетрадиционные методы, такие как электроимпульсная обработка, магнитно-импульсное воздействие, обработка ускоренными электронами, электрохимическое воздействие, использование ультразвука и наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ). Особенно интересным является применение НЭМИ для разрушения тонкодисперсных минеральных комплексов при переработке труднообогатимой руды. В этой области значительный вклад в исследования электромагнитного воздействия на руду внесли ученые, такие как В.А. Чантурия, И.Ж. Бунин, В.Д. Лунин, М.В. Рязанцева, С.А. Гончаров, П.П. Ананьев, В.П. Бруев, В.Ю. Иванов, А.С. Самарханова, Г.В. Седельникова, Г.С. Крылова и др.

Важную роль в технологии электроимпульсной обработки измельченных руд играет явление электрического пробоя, которое объясняет эффективность извлечения благородных металлов путем вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов (сульфидов, кварца) и их дальнейшего разрушения. Однако руда имеет непостоянный состав, разную электропроводность и собственные дефекты, что затрудняет однозначную интерпретацию результатов при электроимпульсной обработке.

Цель работы: разработка технологии и устройства для воздействия высоковольтными НЭМИ на водную среду с целью изменения её свойств.

Для достижения заявленной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Анализ литературных источников и патентный поиск работ по проблемам магнитной, ультразвуковой, электроимпульсной обработке воды и современного состояния технологии электромагнитной обработки золотосодержащей руды в водной среде.

2. Экспериментальное исследование влияния: во-первых, среды между электродами, во-вторых, состава электродов на энергетические характеристики электродной системы.

3. Разработка и испытание высоковольтной системы на основе генератора НЭМИ и лабораторной установки с электродами из разных

материалов для обработки питьевых и сточных вод, модельных растворов.

4. Провести микроскопический анализ поверхности электродов и осадка после обработки НЭМИ растворов с высокой концентрацией металлов.

5. Разработка пилотной установки обработки НЭМИ золотосодержащей пульпы и расчет её экономического эффекта.

Основная идея: использование высоковольтных наносекундных электромагнитных импульсов для изменения свойств водной среды.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту:

1. Разработана технология для обработки сточных и питьевых вод, модельных растворов и золотосодержащей пульпы на основе эффекта воздействия высоковольтными наносекундными импульсами, генерируемыми маломощным генератором НЭМИ.

2. Экспериментально установлено:

- электрические характеристики электродной системы (продольное, волновое сопротивление, коэффициент отражения и сопротивление нагрузки в водной среде и в воздухе) незначительно различаются между собой вне зависимости от материала излучателя-электрода;

- коэффициент отражения электродной системы по обработке НЭМИ водных растворов составляет 0,1. Данный коэффициент означает, что к обрабатываемой среде подводится 90 % энергии от генератора.

3. После обработки водной среды высоковольтными НЭМИ питьевой и сточной вод наблюдается уменьшение содержания некоторых металлов вследствие их осаждения за счет эффекта нанокороткого импульсного воздействия. Экспериментально получено уменьшение содержания Fe, Cu, Zn, Mn, Al на 10–90 % в питьевой, сточных водах на входе и выходе очистных сооружений. При обработке модельного раствора, содержащего соли NiSO_4 и CuSO_4 концентрацией 5 г/л, получены:

- рентгеноаморфный оксигидроксид железа FeOOH размером 30–50 нм, который в 10 раз меньше, чем в образце без обработки;

- «скелетные кристаллы» меди правильной формы, что свидетельствует

о влиянии воздействия НЭМИ на пространственное построение соединений химических элементов.

4. Выявлено, что добавление солей в обрабатываемую пульпу благотворно влияет на скорость выхода в раствор драгоценных и цветных металлов при цианировании. Через 3 ч после цианирования обработанных образцов наблюдается прирост выхода относительно необработанных образцов:

– золота – на 7,85 %, серебра – на 3,18 %, цинка – на 55,55 % при добавлении NaCl;

– меди – на 27,30 % при добавлении BiCl_3 .

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. **Теоретическая значимость** диссертационной работы заключается в расширении физико-химических представлений о воздействии наносекундных импульсов на водную среду. Полученные результаты воздействия НЭМИ схожи с эффектом радиолиза воды с возникновением гидратированных электронов.

2. Экспериментально установлено, что действующая энергия при обработке НЭМИ зависит только от выходных параметров самого генератора, внешние условия (различная обрабатываемая среда, конструкция электродной системы, состав электродов и расстояние между ними) практически не влияют на электрические характеристики.

3. Установлена возможность **практического применения** высоковольтных НЭМИ:

– для доведения питьевой и сточной воды до значений ПДК технологией воздействия высоковольтными НЭМИ;

– подготовки упорных золотосодержащих руд к цианированию. По результатам работы предложена технология обработки НЭМИ пульпы из упорной золотосодержащей руды, которая позволит получить прирост извлечения золота – до 8,4 %, серебра – до 4,16 %, меди – до 27 %, цинка – до 52,56 %.

4. Разработана пилотная установка по обработке НЭМИ золотосодержащей пульпы, годовое потребление электроэнергии которой составит не более 40 000 кВт·ч (из них генератор потребит всего 438 кВт·ч). Установка производительностью 315 кг/ч может дать чистую прибыль от 5,3 до 7,6 млн руб. в год.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Научные положения, приведённые в диссертации, соответствуют области исследований специальности 2.2.4 – Электротехнология и электрофизика, в частности, п. 5 «Разработка новых электротехнологических и электрофизических процессов для получения и обработки металлов, сплавов, композиционных и других материалов с заданными физическими, химическими и механическими свойствами, в том числе для нужд металлургической, металлообрабатывающей, строительной, нефтегазовой, атомной, химической, электротехнической, электронной, авиационной промышленности, предприятий ВПК и других отраслей промышленности».

Достоверность полученных результатов подтверждена патентной чистотой разработанных технических решений. Все лабораторные анализы проведены в аккредитованных и сертифицированных лабораториях.

Методология и методы исследования. Методология исследования основана на экспериментальном изучении воздействия НЭМИ водную среду и сопоставлении полученных данных с теорией. В качестве источника НЭМИ использовались генераторы:

- GPN Института ядерной физики РАН с параметрами: амплитуда напряжения – 5 кВ, длительность импульса – 1 нс, фронт – 0,1 нс, частота – 1 кГц;
- ФИД-генератор ЗАО «НПАО ФИД-ТЕХНОЛОГИЯ» (Санкт-Петербург) с параметрами: амплитуда напряжения – 7...15 кВ, длительность импульса – 0,6 нс, фронт – 0,01...1 нс, частота – 100...1000 Гц.

Для обработки разных сред были сконструированы электродные системы. Электрические характеристики электродных систем измеряли

методом импульсной рефлектометрии с использованием малогабаритного импульсного рефлектометра Р5-15. Измерения значений рН растворов проводились иономером И-130. Для определения содержания металлов в растворах их солей был использован атомно-абсорбционный спектрометр «Спектр-5». Определение морфологических особенностей образовавшихся соединений до и после обработки НЭМИ было произведено на электронном микроскопе JEOL JSM 648 CLV с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа в научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии на базе кафедры «Материаловедение и физико-химия материалов» Южно-Уральского государственного университета (Национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ)) и на комплексе сканирующей электронной микроскопии Jeol JSM 700IF, EDS Oxford INCA X-max 80, WDS Oxford INCA WAVE, EBSD и HKL, который находится в научно-образовательном центре «Нанотехнологии», ЮУрГУ (НИУ).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на XIX Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2013 г.); Международной заочной научно-практической конференции «Современная наука и образование: инновационный аспект» (г. Москва, 2013 г.); Всероссийской конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2013 г.); XX Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2014 г.); IV Всероссийской научной молодежной школе-конференции «Химия под знаком СИГМА: исследования, инновации, технологии» (г. Омск, 2014 г.); XIII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2016 г.); Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (г. Челябинск, 2016 г.); XXI Международном научном симпозиуме имени академика М.А. Усова студентов

и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2017 г.), XVI Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, 2023 г.), III Всероссийской молодежной конференции «Бутаковские чтения» (г. Томск, 2023 г.), XXVIII Международном молодежном научном симпозиуме имени академика М.А. Усова (г. Томск, 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, из них 4 работы – в периодических изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 3 работы – в периодических изданиях, входящих в базу данных SCOPUS, получен 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы получены в рамках выполнения Государственного задания № 075-03-2022-108/5 (FSWW-2022-0018).

Личный вклад автора. Аналитический обзор научно-технической информации, патентный поиск существующих методов воздействия водную среду, а также планирование и проведение экспериментальных исследований, анализ и обобщение полученных данных, формулирование выводов.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы (154 наименования), содержит 145 страниц основного текста, в том числе 41 рисунок, 40 таблиц.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Вода является главным компонентом нашей планеты, выполняющим критически важную роль в абсолютно любых химических реакциях. В биологических системах вода является незаменимой частью, определяющей жизнь, что подчеркивает ее исключительную значимость. Таким образом, вода представляет собой стратегически важный ресурс для всего живого на Земле.

В последние десятилетия наблюдается рост дефицита пресной и чистой воды, поэтому задачей современного человека становится сохранение и поддержание воды в чистом состоянии для будущих поколений. Вода, являясь фундаментом для всех биологических существ на Земле, состоит из молекулярных соединений: ассоциатов и кластеров. Даже при небольшом воздействии или под влиянием внешних факторов эти соединения способны трансформировать свои биологические, физические и химические свойства.

Изменение физико-химических характеристик и структуры воды при любых способах выведения её из квазиравновесного состояния требует комплексного подхода к ее исследованию. Способы активации воды, включая радиолиз, электролиз, фотолиз, а также обработку магнитным полем, электрическими разрядами и электромагнитными импульсами, инициируют генерацию активных химических частиц, среди которых могут быть свободные радикалы и заряженные ионы, которые образуются вследствие распада структурных единиц воды. Это приводит к увеличению её каталитических и реакционных свойств. На сегодняшний день сфера активации воды не имеет четкой теоретической основы, и не существует единой универсальной модели для систематизации данных явлений. Поэтому исследование влияния внешних воздействий на воду становится многоаспектной задачей, требующей детального и многоуровневого подхода. Далее приводятся основные методы выведения воды из квазиравновесного состояния.

1.1 Электролиз

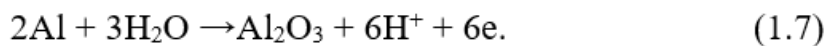
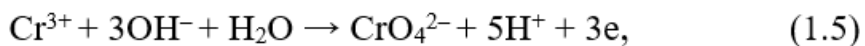
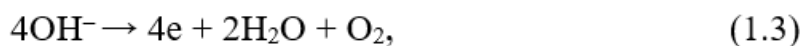
Электролиз – это электрохимические окислительно-восстановительные реакции на поверхности электродов, приводящие к разложению веществ в растворе или разложению электролита под воздействием электрического тока, что приводит к образованию новых химических соединений [1].

При электролитической диссоциации происходят два основных процесса: движение ионов в проводящем растворе под воздействием электрического напряжения к электродам и перенос заряженных частиц между ними.

Положительно заряженные частицы перемещаются к катоду, где они проходят восстановительный процесс, превращаясь в ионы с меньшей степенью окисления или в атомы [1, 2]:



В процессах, происходящих на аноде, могут участвовать и нейтральные молекулы, хотя их роль чаще всего рассматривается как промежуточные вещества электролиза. Анионы, в том числе ионы кислотных остатков и гидроксильных групп, направляются к аноду, где происходит их окисление [1, 2]. Например:



Скорость анодных и катодных реакций зависит от различных параметров, таких как состав и концентрация электролита, свойства материала электрода, потенциал, температура. Ключевым показателем в оценке этих

процессов служит величина заряда, которая определяется количеством электрических токов, протекающих через 1 м² поверхности электрода за установленный период времени.

Электрохимическая реакция сосредоточена на поверхностях электродов, которые служат своего рода стоком заряженных частиц, подходящих из объёма фазы к поверхности вглубь фазы. Это исключает избыток или недостаток заряженных частиц на поверхности, тем самым происходит передача зарядов, обеспечивая непрерывный электрический ток. Для выделения 1 грамм-эквивалента вещества на электроде необходимо количество электричества, равное 26,8 А·ч. Электролиз позволяет регулированием силы тока управлять скоростью и направленностью процесса.

Электрохимические реакции при электролизе подчиняются законам, изложенным М. Фарадеем, в которых определено, что масса m превращаемых в реакции веществ строго пропорциональна количеству прошедшего через гальваническую цепь электричества q , а также химическим эквивалентам k_s (отношениям молярной массы M к количеству электронов n , участвующих в реакции одной молекулы $k_s = M/(nF)$) каждого вещества: $m = k_s \cdot q$.

1.2 Электрохимическая активация

После обнаружения при электролизе новых свойств католита и анолита, которые проявляются при воздействии на биологические объекты, возрос интерес к электрохимической активации воды.

В исследованиях [3–5] показано, что при наличии анолита в анодной зоне при генерации активных окислителей наблюдается его ингибирующий эффект, который снижает скорость клеточного деления. В то же время прояснение механизмов активирующего влияния католита до сих пор вызывает вопросы. Лобышев и Петрушанко [6] описывают свойства анолита и

католита при электролизе разбавленного раствора хлорида натрия и дистиллированной воды.

Основные особенности электрохимической активации:

1. Для раствора хлорида натрия концентрацией до $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л наблюдается сохранение величины окислительно-восстановительного потенциала (ОВП). Однако при понижении концентрации до 10^{-4} моль/л наблюдается резкое уменьшение ОВП, а в дистиллированной воде его снижение превышает 700 мВ в течение 15 мин. Причины этого аномально быстрого снижения ОВП остаются неясными. Расчетные данные указывают, что уменьшение ОВП до отрицательных значений не может быть связано с образованием молекулярного водорода на поверхности катода или увеличением pH. Если сравнить ОВП исходного подкисленного раствора и католита, при плавном уменьшении pH подкислением, то ОВП второго будет намного ниже.

2. Зависимость ОВП от pH непропорциональна.

3. Через три дня после завершения электролиза происходит восстановление до новых равновесных уровней pH и ОВП. Большинство этих изменений регистрируется в первый день. Резкое возрастание ОВП происходит из-за барботирования кислородом, аргоном.

4. Скорость релаксации можно уменьшить добавлением концентрированного раствора или замораживанием. Предполагается, что именно замораживание может стать причиной биологического действия, как указано в исследовании [7].

1.3 Магнитная обработка

На основании исследования, проведенного В.И. Классен, при магнитной обработке воды за счет того, что она обладает некоторой электропроводностью, возбуждается электрический ток [8].

В исследованиях, посвященных эффекту от воздействия магнитных полей на характеристики воды, фиксируются разнообразные результаты, обусловленные множеством факторов. Прежде всего, при магнитной обработке из-за малых изменений необходима высокая точность опытов. Во-вторых, в опытах отсутствует точная стабилизация различных условий. А также не менее важно учитывать действующие факторы, такие как влияние естественных магнитных полей на воду, в частности воздействие солнечной активности, а также атмосферное давление, климатические условия и др. [8].

Под действием магнитного поля на движущуюся воду понимают действие силы Лоренца на заряженные частицы:

$$E = k \cdot H \cdot v, \quad (1.8)$$

где k – некоторый коэффициент; H – напряженность магнитного поля; v – скорость движения жидкости.

Под воздействием магнитного поля в водном растворе образуются центры кристаллизации и происходит выделение карбонатов не в виде накипи, а в виде взвешенных частиц – шлама [9]. Гипотеза об общем солевом составе главным образом о том, что ионы железа влияют на создание центров кристаллизации. Возникновением упорядоченных сложных плотноупакованных молекулярных структур объясняют влияние на структуру воды [10]. Также есть гипотеза о распаривании в атомах кислорода двух пар $2p^4$ электронов с переходом их на разные уровни энергии, далее происходит возбуждение молекулы воды, и она образует с атомом водорода другой молекулы водородную связь, что дает новую структуру строения воды [11].

Наиболее заметные изменения после обработки магнитным полем наблюдаются на границе раздела фаз – твердой и жидкой. В практическом применении основой является кристаллизация, растворение, смачивание, кипение, коагуляция, адсорбция и поверхностные химические реакции, которые протекают в гетерогенных условиях [12].

Исследования, касающиеся изменения природы жидкости в областях перехода между различными физическими состояниями вещества, являются

основой научных работ Б.В. Дерягина. Им же был введен термин «граничная фаза», представляющая собой фазовый переход – изменение свойств воды вблизи гидрофильной поверхности [13]. Кроме того, исследования свойств приграничных растворов приведены в работах и других ученых, таких как В.Л. Воейков, G.H. Pollack и G.N. Ling [14–16].

В работе [12] представлены эксперименты по магнитной обработке воды, регистрировались изменения плотности, вязкости, электропроводности, состава и т. д. В этом же источнике через магнитное поле с напряженностью $H = 536$ кА/м пропускали бидистиллят со скоростью 0,8 м/с. Наблюдалось изменение плотности на 0,02...0,025 %, также представлены результаты увеличения плотности растворов соляной, серной кислот после магнитной обработки. Измерение проводилось капиллярным пикнометром с максимально возможной ошибкой 0,0005 %. Было выявлено уменьшение плотности до исходного значения обработанного раствора через сутки после проведенных экспериментов. Отмечается влияние магнитной обработки на вязкость воды: вязкость бидистиллята и водопроводной воды увеличилась на 2...3 % и более.

В работе [17] приводятся данные об уменьшении вязкости водных растворов сульфата никеля и сульфата натрия, в частности, при напряженности магнитного поля от 120 до 200 кА/м вязкость сульфата никеля понижается на 1,5 %. Есть данные о повышении вязкости дистиллированной воды на 1...2 % при воздействии магнитного поля напряженностью $H = 110$ кА/м.

Несмотря на то, что диамагнетизм чистой воды очень мал, наблюдаются изменения в присутствии газов и других примесей. Магнитная восприимчивость может являться объективной оценкой воздействия магнитных полей на свойства воды, т. к. наблюдается её изменение после обработки.

Важную роль при магнитной обработке воды играет концентрация и характер её примесей. В общем случае, увеличение концентрации примесей

приводит к большим изменениям свойств воды при обработке, например вязкости, поверхностного натяжения, диэлектрической проницаемости и др. Есть сведения и о неизменности этих свойств [18, 19].

Одной из объективных характеристик омагниченной воды является измерение инфракрасных спектров поглощения. По проведенным исследованиям установлено [20], что магнитная обработка изменяет инфракрасный спектр омагниченной воды.

В работе [12] отмечены изменения показателя преломления, спектров поглощения воды и растворов при магнитной обработке. У этого же автора описано влияние магнитной обработки на удельную электропроводность воды. Выявлено, что при $H = 540$ кА/м и $v = 0,8$ м/с на 6...20 % уменьшается удельная электропроводность бидистиллята.

Отмечено изменение рН растворов под воздействием магнитных полей: при $H = 540$ кА/м при обработке бидистиллята рН с 6,36 повышался до 6,56. Обработка водопроводной воды при тех же условиях дала аналогичные результаты: увеличение рН составило 0,15...0,3 единицы [9].

В работе [21] выявлено, что в интервале от 0 до 100 °С диамагнетизм воды возрастает. Объясняется это тем, что с ростом температуры происходит нарушение степени ассоциации молекул воды. Возможно, это происходит от отставания скорости изменения магнетизма воды от изменения перестройки структуры воды за счет температуры. Авторы приходят к выводу, что чем молекулярные связи развиты меньше, тем больше магнетизм.

Также при обработке магнитным полем стали, чугуна и алюминия в растворах хлорида натрия с концентрацией 0,21 г/л наблюдается снижение коррозии в 3...9 раз [22]. Объясняется это тем, что воздействие магнитного поля уменьшает концентрацию кислорода в воде и способствует образованию защитного слоя на поверхности металла.

Есть данные о влиянии магнитной обработки на скорость разложения перекиси водорода. В омагниченном растворе под действием

ультрафиолетового облучения снижается скорость разложения перекиси водорода [12].

Проведено большое количество опытов В.С. Духаниным по исследованию влияния магнитной обработки на гидратацию находящихся в воде ионов. По результатам проведенных опытов автор приходит к выводу, что после воздействия магнитных полей уменьшается гидратация диамагнитных ионов и несколько возрастает гидратация парамагнитных. Явные изменения происходят в разбавленных растворах и у ионов, стабилизирующих структуру воды (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Li^{+}) или образующих с ней гидроксо- и аквакомплексы (Fe^{3+} , Ni^{2+} , Cu^{2+}).

В проделанных опытах В.С. Духанин подтвердил, что воздействие магнитным полем на водный раствор зависит от природы раствора, его концентрации, состава и находящихся в нем ионов, которые усиливают либо ослабляют эффект обработки.

Анализ патентов последних лет (2010–2023 гг.) демонстрирует актуальность магнитной обработки воды для её очистки [23–30]. В таблице 1.1 представлен перечень патентов за последние годы по РФ по данной теме.

Таблица 1. 1 – Перечень патентов по РФ по критерию «магнитная обработка воды»

Год приоритета	Название документа	Код документа
2010	Устройство для магнитной обработки воды в потоке	RU 93080 U1
2012	Способ одновременной обработки воды электрическим и магнитным полями и устройство для его осуществления	RU 2012 108 701 A
2013	Способ и устройство для магнитной обработки растений, пищевых продуктов и воды	RU 2012 126 487 A
2015	Устройство для магнитной обработки воды и водных растворов	RU 157105 U1
2017	Устройство для обработки воды электрическим и магнитным полями	RU 171986 U1
2019	Способ магнитно-реагентной обработки сточных вод	RU 2 708 607 C1
2020	Устройство для обработки воды с магнитным креплением	RU 198610 U1
2020	Устройство для магнитной обработки жидкости, в частности воды	RU 2019 111 555 A
2021	Способ очистки фильтрационных вод полигонов захоронения твердых бытовых отходов	RU 2 775 552 C1
2022	Способ очистки акваторий от шламов нефти и нефтепродуктов и установка для его реализации	RU 2 775 016 C1
2023	Способ утилизации животноводческих стоков на органические удобрения и биогаз	RU 2 787 785 C1
2023	Способ очистки промывных сточных вод от шестивалентного хрома	RU 2 791 260 C1

1.4 Радиоллиз

Термин «радиоллиз» охватывает все химические процессы, инициируемые различными видами излучений. Он описывает любые химические реакции, возникающие в результате поглощения веществом ионизирующего излучения [1].

В физике ионизирующее излучение представляет поток элементарных частиц или фотонов, которые способствуют ионизации атомов и молекул. Этот вид излучений классифицируется по природе на две основные категории: корпускулярное и электромагнитное.

Характеризирующей величиной воздействия ионизирующих излучений является линейная передача энергии (ЛПЭ), за которую принимают переданную среде ионизирующей частицей энергию в заданной окрестности её траектории на единицу длины. Определяют ЛПЭ в диапазонах от 0,2 до 10^4 эВ/нм, которые соответствуют ЛПЭ высокоэнергетичных фотонов, электронов и электронов осколков деления тяжёлых ядер соответственно. Также определяющей величиной является доза поглощенной энергии – переданная энергия единице массы среды при ионизирующем излучении.

Выделяют два вида радиолиза: импульсный радиолиз и импульсный фотолиз. Первый метод был разработан в 1960 г. независимо тремя группами исследователей: Р. Мак-Карти и А. Мак-Локланом (Великобритания), М. Матесоном и Л. Дорфманом (США), Дж. Кином (Великобритания). Метод импульсного радиолиза используют для изучения быстрых и образовавшихся в результате короткоживущих (от 10^{-1} до 10^{-12} с) продуктов. Для генерации импульсов используют электронные ускорители (включая электронные линейные, высоковольтные и сильноточные) и электронные импульсные преобразователи и рентгеновские трубки. Продолжительность одного импульса колеблется от 10^{-3} до $2 \cdot 10^{-11}$ с. Оптические и электрические методы являются основным способом для идентификации образованных частиц. Наиболее распространённым методом является спектрофотометрия. Импульсный радиолиз используется для создания сольватированных и предсольватированных электронов, карбанионов, свободных радикалов, ион-радикалов и другие структуры [31].

Распад молекул под действием поглощенного света называется импульсным фотолизом, который можно подразделить на два типа: фотодиссоциация и фотоионизация. Фотодиссоциация включает в себя

разложение свободных радикалов и молекул с меньшим числом атомов. В отличие от этого, фотоионизация связана с распадом как положительно, так и отрицательно заряженных ионов после поглощения световой энергии.

В середине XX в. Р. Дж. Норриш и Дж. Портер разработали подход, названный импульсным фотолизом, для регистрации короткоживущих частиц и возбуждённого состояния молекул при обработке молекул вещества коротким импульсом. Повышение точности экспериментальных исследований стало возможным благодаря применению импульсных лазеров, в том числе жидкостных, с длительностью и энергией импульса $10^{-8} \dots 10^{-7}$ с и $0,001 \dots 1$ Дж соответственно. Также использовались импульсные лампы, способные излучать в ближнем ультрафиолете и инфракрасных спектрах с длительностью вспышки $10^{-6} \dots 10^{-3}$ с. В современной практике также нашли свое применение и импульсные лазеры с синхронизацией мод с длительностью и энергией импульса $10^{-12} \dots 10^{-11}$ с и $10^{-5} \dots 10^{-3}$ Дж, соответственно. Этот метод дает возможность детально изучать фотохимические реакции, процесс фотосинтеза, а также разные состояния молекул, таких как возбужденные синглетные и триплетные, свободные радикалы, ионы, ион-радикалы и др. Действие фотолиза может изменять некоторые условия реакции: температуру, pH.

1.5 Сонолиз

Ультразвуковая обработка представляет собой процесс изменения физических свойств жидкости под влиянием ультразвуковых волн. Недавние исследования в области механохимии выявляют интерес к изучению химических и физико-химических реакций при механическом воздействии. В исследовании [32] анализируется процесс расщепления поляризованной воды под действием звуковых колебаний, после заморозки-оттаивания, а также в этапах конденсации и испарения. В источнике [33] определено, что

эффективность расщепления воды при ее прохождении через капилляры достигает 3...4 масс. %, а эффективность механо-каталитического расщепления воды до O_2 и H_2 при ее перемешивании в присутствии взвеси окислов железа, меди или никеля возрастает более чем на 4 масс. %

Первые результаты по разложению воды с помощью механической энергии получили обработкой воды ультразвуком. При такой обработке происходит процесс перехода вещества в метастабильное химически активное состояние и поглощения механической энергии.

Различают два основных типа реакций при ультразвуке. Первый тип включает в себя такие процессы, как разложение диасоединений, окисление альдегидов и изменение активности катализаторов. Хотя эти реакции могут протекать и в отсутствие ультразвука, их кинетика будет существенно снижена, однако включение ультразвука приводит к значительному ускорению этих реакций. Второй тип реакций, напротив, требует обязательного воздействия ультразвука, т. к. при его отсутствии протекать реакции не могут.

При поглощении ультразвука возникает кавитация, так называемые кавитационные пузырьки – это образование полостей в капельках жидкости, внутри которых находится пар. Характеризующей величиной ультразвуковых воздействий является порог кавитации. Кроме процесса кавитации, в жидкостях возникают микропотоки, нагревание и распыление. Далее происходит схлопывание пузырьков, а возникающая энергия расходуется на излучение ударных волн, нагрев газа в кавитационных полостях, образование свободных радикалов и создание шума. В процессе кавитации внутри кавитационных пузырьков различают процессы ионизации и диссоциации молекул воды, газов и веществ. Далее происходит схлопывание кавитационных пузырьков, вследствие чего наблюдается расщепление молекул воды и переход в обрабатываемую жидкость радикалов H , OH , а также переход молекул воды в возбужденное состояние. Кроме этого, в раствор переходят ионы и электроны, вещества с высокой упругостью пара,

продукты их взаимодействия и частичной рекомбинации. В результате происходят различные реакции образовавшихся радикалов и частиц с другими веществами, растворенными в жидкости.

Влияние звуковых волн на растворы в основном определяется природой элементов в жидкой среде. Ультразвуковые колебания приводят к разрушению частиц воды, заключенных в этих пузырьках. Эффективность «звухимического» процесса напрямую зависит от характеристик газа, растворенного в жидкости.

Оптимальным аспектом, определяющим успешность звухимической реакции, является достижение уровня пороговой кавитации. Исследования показали, что увеличение частоты не оказывает заметного влияния на эффект воздействия. Увеличение частоты уже свыше 3 МГц создает трудности для возникновения кавитационных явлений [34].

Влияние ультразвуковых волн на химические реакции аналогично действию катализаторов, поскольку они увеличивают химическую активность веществ. Существуют различные теории, касающиеся сонолиза, одна из них утверждает, что резкое увеличение термодинамических параметров, возникающее при схлопывании кавитационных пузырьков, является основным результатом его воздействия.

Другие исследователи полагают, что из-за разности потенциалов между стенками кавитационной полости возникают электрические разряды. Эти разряды порождают люминесценцию и обуславливают фотохимическое расщепление воды. Также существует теория, что сонолиз происходит из-за высоких локальных давлений. Важным критерием, характеризующим влияние звуковых волн, является количество молекул, образующихся при поглощении энергии в 100 эВ.

В работе [35] описан эффект синхронного разгорания в воде сонолюминесценции и появления акустических сигналов на субгармониках частоты накачки, но его свойства мало изучены, и механизм эффекта практически не обсуждался.

В работах [36–39] описано воздействие механических колебаний большой интенсивности на воду и водные растворы. Можно выделить работы А.Ф. Кладова [36, 37], в своих исследованиях он предложил способ уменьшения активности радионуклидов с использованием механической активации. Требуемая интенсивность колебаний должна составлять больше 1 МВт/м^2 . Эти колебания приводят к возникновению в воде кавитационных пузырьков. При схлопывании пузырьков выделяется энергия, значительно большая, чем затраченная. Она существенно изменяет свойства воды и содержащихся в ней веществ. Лабораторная установка состоит из гидродинамического генератора звука роторного типа, питаемого от двигателя мощностью 15 кВт. Частота колебаний – $5,9 \cdot 10^3$ Гц, рабочее давление – 1 МПа, объем активной зоны – 250 см^3 . Конструкция активатора подробно описана в патенте [36].

В патенте Г.С. Кармацкого и В.Д. Сисина [38] описано устройство для концентрирования и уменьшения массы жидкости кавитирующим устройством с рабочим давлением 0,3 МПа. При воздействии на промышленную воду отмечается выигрыш в величине потребляемой мощности в 2,3 раза и увеличение скорости испарения в 1,5 раза по сравнению с обычным нагреванием.

В.С. Афанасьев [39] предлагает очистку жидких радиоактивных растворов (ЖРО) воздействием высокочастотных электромагнитных колебаний, которые создают гидродинамический эффект. Автор приводит примеры процессов, в которых можно использовать данный эффект, – это опреснение воды, очистка нефти от примесей, очистка ЖРО и т. д., также он выделяет преимущества данного метода: отсутствие расходных материалов; малые габариты установки.

Из последних работ по обработке воды ультразвуком (за последние 5 лет) можно назвать патенты А.А. Вьюгиновой и А.А. Новик, в которых представлено устройство для очистки замкнутых водоемов и бассейнов от

микробиологических загрязнений с помощью ультразвука. Устройство состоит из генератора электрического сигнала и излучателя [40, 41].

1.6 Электрические разряды в воде

Впервые применение явления электроэрозионного разрушения металлов электрическими разрядами в жидкостях для получения коллоидных растворов описано в работе [42]. В настоящее время этот метод получил широкое распространение во многих областях промышленности. Самой главной особенностью в электроразрядной обработке является способность импульсных разрядов в воде создавать плотную плазму с высокой температурой, поэтому этот метод относят к разделу науки плазмохимии. В 1960-х гг. отечественную школу плазмохимии обосновал Л.С. Полак [43–46]. Исследование плазмохимии охватывает различные физико-химические явления и превращения, возникающие в условиях низкотемпературной плазмы, где температура колеблется $10^3 \dots 10^5$ К, а степень ионизации варьируется от 10^{-6} до 10^{-1} .

Различают неравновесную и квазиравновесную низкотемпературную плазму. Неравновесную плазму получают при давлении 30 кПа, когда температура свободных электронов намного выше температуры молекул и ионов. Главной особенностью неравновесной плазмы являются плазмохимические процессы, обусловленные «горячими» электронами. Квазиравновесную плазму можно получить при давлении, близком к атмосферному и выше, и общей температурой для всех частиц.

Предполагается, что плазменный столб импульсного разряда в воде является мощным импульсным излучателем УФ-излучения, т. к. он имеет температуру $T = (10 \dots 20) \cdot 10^3$ К и давление $P = 10^7 \dots 10^9$ Па [47], причем стоит заметить, что в диапазоне длин волн $\lambda = 100 \dots 200$ нм доля излучения может быть весьма значительной. Именно этот участок спектра электромагнитного излучения, поглощаемого водой, вызывает реакцию фотолиза [48, 49]:



Количественным показателем реакции является концентрация образовавшегося молекулярного и атомарного водорода или его пероксида (H_2O_2). Зависимость концентрации перекиси водорода от передаваемой средней удельной энергии в обрабатываемой среде при электрическом разряде показана на рисунке 1.1.

На основании рисунка можно сделать вывод, что концентрация H_2O_2 обратно пропорциональна примесям, содержащимся в воде. Аналогичные результаты были получены в работе [48] для концентрации водорода, образовавшегося в результате облучения воды УФ-излучением.

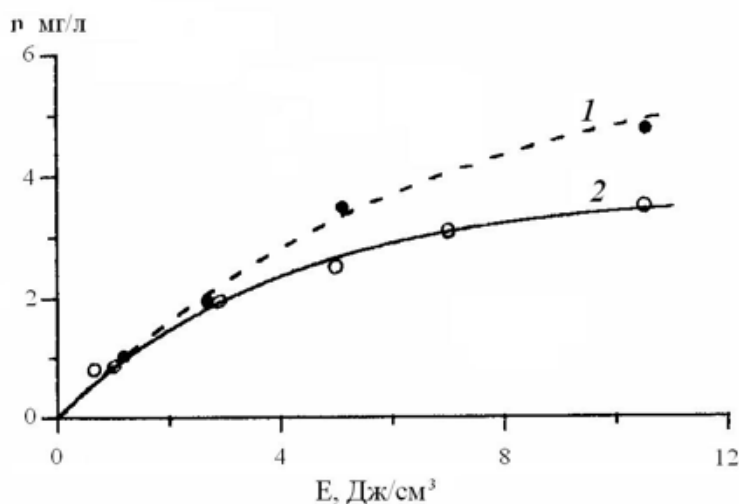


Рисунок 1.1 – Зависимость концентрации перекиси водорода от величины удельной энергии разряда:
1 – дистиллированная вода; 2 – водопроводная вода

Данная кривая зависимости концентрации перекиси водорода от энергии электрических разрядов указывает на фотолиз. Он порождает электромагнитное излучение, которое при $T = (1...2)10^4 \text{ K}$ имеет сплошной или близкий к сплошному спектр излучения абсолютно черного тела. Интенсивность УФ-излучения в диапазоне длин волн 100–200 нм при данной температуре занимает большую часть от всего спектра. В диапазоне 100...200 нм УФ-излучение поглощается, что приводит к образованию H_2O_2 [48, 49, 50]. В свою очередь, молекулы перекиси водорода интенсивно поглощают кванты

с длиной волны 200...300 нм. По полученным в эксперименте данным можно сделать вывод, что в равной степени идут процессы и возникновения, и разложения H_2O_2 [50].

Из рисунка 1.1 следует, что при воздействии электрического разряда с одинаковыми характеристиками массовая концентрация H_2O_2 в дистиллированной воде больше, чем в водопроводной. Это связано с влиянием концентрации примесей в водопроводной воде, например ионов меди или железа, на разложение перекиси водорода, обусловленное эрозией электродов в водной среде.

В работах [51–67] более подробно рассмотрен процесс воздействия электрических разрядов на воду. Опыты показали, что при воздействии электрических разрядов на водопроводную воду концентрация перекиси водорода со временем уменьшается вплоть до близкого к нулевому уровню в течение нескольких дней [68].

Говоря об электрическом разряде в воде, следует иметь в виду воздействие на водный раствор короткоживущих радикалов и ионов [69]. Исследуются различные виды разрядов, такие как искровой пробой [70], электролиз в тлеющем разряде [71, 72], стримерный разряд вблизи поверхности воды [73].

Для оптимизации энергозатрат при обработке воды необходимо создать условия для непосредственного контакта плазмы электрического разряда и воды, поэтому исследования в этом направлении дали виток развитию импульсной технологии обработки воды [74]. В работах [53, 56, 75–78] представлены результаты экспериментов электроимпульсной обработки воды, при котором происходит распад органических соединений, растворенных в воде, и, кроме этого, наблюдается обеззараживание.

Различают стримерный и тепловой пробой в междуэлектродном пространстве [51, 79]. Пробой между остриём и плоскостью называют стримерным или лидерным пробоем. Тепловым пробоем называют процесс,

при котором ток проводимости разогревает и испаряет воду у электродов, образуя газовый мостик.

Во время стримерного и теплового пробоя при давлении около 10^3 атм происходит интенсивное нагревание плазмы до температуры 10^4 К. Плотность плазмы может достигать 10^{20} частиц/см³, а длина пробойного промежутка непосредственно зависит от напряженности поля между электродами. При этом особое внимание уделяется процессу гидродинамического удара и его характеристикам.

В зависимости от поставленных задач подбираются определенные параметры разряда: длительность и энергия. Наилучшие результаты достигаются при длительности разряда от 10^{-1} до 100 мкс, мощности и энергии $10^2 \dots 10^5$ кВт и $1 \dots 10^5$ Дж соответственно.

В исследованиях Л.А. Юткина подробно рассмотрены случаи гидродинамических ударов, вызванных электрическими разрядами. В публикациях осуществлен анализ возникновения кавитационных полостей и подробно описаны свойства возникающего магнитного поля [80].

В 1960-х гг. XX в. под руководством А.А. Воробьева исследовательская группа обнаружила и ввела понятие «запасенная энергия кристалла», которая проявляется после обработки материалов. Объяснение этого явления кроется в термодинамической инертности твердого тела, обусловленной образованием дефектов в кристаллической структуре обрабатываемого тела под влиянием облучения.

Величина свободной энергии зависит от внутренней энергии U , абсолютной температуры T , энтропии S , напряженности электрического поля E , электростатической индукции D , относительной деформации ε , механического напряжения σ и поглощенной энергии при облучении W :

$$F = U - TS - \frac{ED}{2} - \frac{\varepsilon\sigma}{2} - W.$$

В частности, электрический взрыв проводников (ЭВП) рассматривают как способ запасенной энергии в особом состоянии металлического

проводника: в виде жидкости, пара и плазмы. Однако исследования, указанные в публикациях [81,82], демонстрируют, что ЭВП не следует рассматривать только через призму квазиравновесных или равновесных процессов.

В 1970-е гг. Г.В. Иванов начал исследования по получения ультрадисперсных порошков с помощью ЭВП. По результатам проведенных работ были защищены кандидатские диссертации [83–88]. За эти годы были определены условия, а также формы регулирования химического, фазового состава и дисперсности продуктов при проведении ЭВП в жидкой среде. В ходе исследований было выявлено, что не только конденсация испарившейся части проводника приводит к образованию нанопорошков, но и диспергирование жидкого металла [83]. В частности, исследование [84] содержит данные о синтезе нанопорошков железа и вольфрама при различных условиях ЭВП. Другая работа [85] включает результаты экспериментов по производству порошков серебра и титана, демонстрируя различия в их строении и дисперсности в зависимости от среды и параметров проводника. Значительный вклад в эту область технологии внёс А.П. Ильин [89–93].

Исследовательские работы [81, 94, 95] посвящены синтезу наноразмерного оксида никеля с применением переменного тока. Данный процесс осуществляется при температурных условиях 343 К и параметрах тока: частота 20 Гц, плотность синусоидального тока $2,5 \text{ А/см}^2$.

При импульсном воздействии на жидкость, если длительность импульса превышает одну наносекунду, наблюдается явление пробоя, приводящее к образованию проводящих каналов с диаметром от одного до нескольких десятков микрометров. Установлено, что с увеличением электропроводности жидкости и ростом амплитуды напряжения наблюдается как увеличение числа разрядных стримеров, так и их интенсивность. При определённых условиях стримеры могут охватывать всю область между электродами. После образования проводящего контакта между электродами, возникшего за счет стримеров, наблюдается возрастание тока разряда, а разностное напряжение между ними снижается до 600...800 В. Температура в области

сформированного канала может колебаться в пределах 14000...50000 К, а плотность электронов варьируется от 10^1 до 10^{18} см⁻¹.

В исследовании [68] обосновано преимущество изменения импульсных воздействий с минимально необходимой мощностью около 1 Дж, т. к. при больших значениях энергии происходит эрозия электрода и выход его материала в обрабатываемую среду. Установлено, что при значениях, превышающих 200 Дж/см, образуются ударные волны, которые приводят к схлопыванию парогазовых пузырьков, а это в свою очередь ухудшает функциональные характеристики электрода и снижает его эффективность.

Патентный поиск последних лет [96–108] демонстрирует активное использование и развитие электроразрядной обработки воды для ее очистки и обеззараживания (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Перечень патентов по РФ по критерию «электроразрядная обработка воды»

Год приоритета	Название документа	Код документа
2015	Устройство для очистки воды	RU 158367 U1
2015	Устройство для очистки загрязненной воды	RU 156243 U1
2016	Устройство обработки жидкостей барьерным разрядом	RU 161968 U1
2017	Способ очистки жидкости при одновременной очистке фильтроэлемента	RU 2 600 641 C9
2017	Устройство для обработки воды электрическим и магнитным полями	RU 2016 111 797 A
2017	Способ очистки и обеззараживания воды	RU 2016111 797 A
2017	Устройство для очистки загрязнённой воды	RU 174491 U1
2018	Плазмокаталитический реактор обработки жидкости барьерным разрядом	RU 185700 U1
2019	Устройство плазмодинамической очистки сточных вод	RU 186727 U1
2019	Устройство магнитно-плазменной обработки жидкостей	RU 188655 U1
2019	Устройство для обеззараживания воды	RU 194143 U1
2019	Способ магнитно-реагентной обработки сточных вод	RU 2 708 607 C1
2020	Устройство и способ очистки сточных вод от фенола	RU 2 712 565 C1
2020	Реактор магнитно-плазменной обработки жидкостей	RU 195077 U1
2022	Способ гидродинамической очистки воды и устройство для гидродинамической очистки воды	RU 2 769 109 C1

К воздействию электрических разрядов на воду можно отнести предложенный в 1996 г. В.В. Крымским метод воздействия на воду наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ). Некоторые результаты данного метода, представленные в работах [109–111, 113,114], будут приведены ниже.

1.7 Наносекундные электромагнитные импульсы

Н.Ф. Harmuth был первым из авторов, предложивших использовать несинусоидальные волны в виде прямоугольных импульсов в радиолокации. На основе классических принципов излучения волн и уравнений Максвелла формировалась теория излучения импульсных полей. Конечным результатом теории является временное распределение электрического импульсного поля, описываемое векторами E и H , в определенной области свободного пространства. На основе предложенных параметров оцениваются характеристики поля и его воздействие на вещество [112].

Импульсное поле характеризуется воздействием однополярных импульсов тока, которые могут быть положительными или отрицательными. Длительность импульса, обозначаемая как τ , обычно устанавливается на уровне 50 % от амплитуды, хотя в некоторых случаях может снижаться до 10 %. Значения 0,1 и 0,9 применяются для определения длительности переднего и заднего фронтов импульса [113]. Визуальное представление формы импульса показано на рисунке 1.2.

Первое и второе уравнения Максвелла в системе СИ:

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \sigma^3 \vec{E} + \vec{j}^{\text{ст}}, \quad (1.10)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \sigma^m \vec{H}, \quad (1.11)$$

где $\vec{E}$ – вектор напряженности электрического поля; $\vec{H}$ – вектор напряженности магнитного поля; $\vec{D}$ – вектор индукции электрического поля; $\vec{B}$ – вектор индукции магнитного поля; $\vec{j}$ – объемная плотность стороннего электрического тока; $\sigma^{\text{Э}}$ и $\sigma^{\text{М}}$ – удельные проводимости электрического и магнитного токов соответственно.

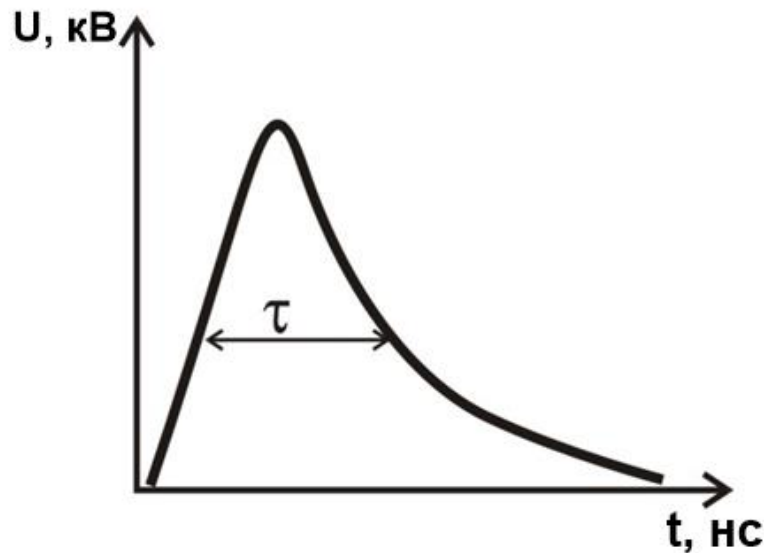


Рисунок 1.2 – Форма импульса

Все напряженности и индукции полей, а также объемная плотность электрического тока и удельные проводимости являются функциями от времени t [113].

Векторы индукции полей связаны с напряженностями полей материальными уравнениями, которые для ряда конкретных сред могут иметь очень сложные выражения. Предположили, что материальные уравнения являются нестационарными:

$$\vec{D} = \varepsilon(t)\vec{E}, \quad (1.12)$$

$$\vec{B} = \mu(t)\vec{H}, \quad (1.13)$$

где $\varepsilon(t)$ – зависящая от времени абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; $\mu(t)$ – зависящая от времени абсолютная магнитная проницаемость среды [113].

Далее подставили материальные уравнения (1.12) и (1.13) в уравнения Максвелла (1.10) и (1.11), и, взяв производные от сложных функций, получили [113]:

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma^3 \vec{E} + \vec{j}^{\text{CT}}, \quad (1.14)$$

$$-\text{rot } \vec{E} = \frac{\partial \mu}{\partial t} \vec{H} + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \sigma^M \vec{H}. \quad (1.15)$$

Через преобразования получено уравнение для векторного потенциала A для среды с изменяющимися во времени диэлектрической ε и магнитной μ проницаемостями, σ^3 и σ^M – удельными проводимостями электрических и магнитных токов:

$$\Delta \vec{A} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{A} - \left(\mu \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + 2\varepsilon \frac{\partial \mu}{\partial t} + \sigma^3 \mu + \sigma^M \varepsilon \right) \frac{\partial}{\partial t} \vec{A} - \\ - \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{\partial \mu}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \mu}{\partial t^2} + \sigma^3 \frac{\partial \mu}{\partial t} + \sigma^3 \sigma^M + \sigma^M \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial \sigma^M}{\partial t} \right) \vec{A} = - \vec{j}^{\text{CT}}. \quad (1.16)$$

Видим, что уравнение имеет восьмимерный характер: любые три пространственные координаты, время и четыре параметра среды ε , μ , σ^3 , σ^M , которые изменяются под действием импульсного поля. Из-за невозможности строгого задания распределения сторонних токов j^{CT} и сложности решения восьмимерного уравнения основным методом оценки выбирается экспериментальный подход.

Имеется решение этого нестационарного волнового уравнения для частного случая падения импульсной электромагнитной волны на бесконечную проводящую поверхность. Эта задача впервые решена В.А. Бухариным в работе [114]. Начальными условиями является наличие неограниченной однородной среды с конечной проводимостью.

Допущено:

– металл имеет сплошную структуру с конечной удельной электрической проводимостью σ^3 ;

- удельную магнитную проницаемость можно исключить;
- токи проводимости намного больше токов смещения.

Далее авторы приводят параболическое волновое уравнение

$$\vec{\Delta E} - \mu\sigma^3 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} = 0. \quad (1.17)$$

Предположили, что импульс напряженности электрического поля амплитудой 1000 В/м и длительностью импульса 0,001 с возбужден на плоской поверхности электрического проводника. В качестве проводника принята медь с удельной проводимостью $\sigma^3 = 5,6 \cdot 10^7$ См/м. Для численных расчетов выбран интервал времени $\Delta t = 10^{-4}$ с, параметр $a = 2,384 \cdot 10^{-3}$ м; и далее было рассмотрено проникновение электромагнитного поля в глубину проводника. На рисунке 1.3 показано изменение напряженности электрического поля на поверхности проводника.

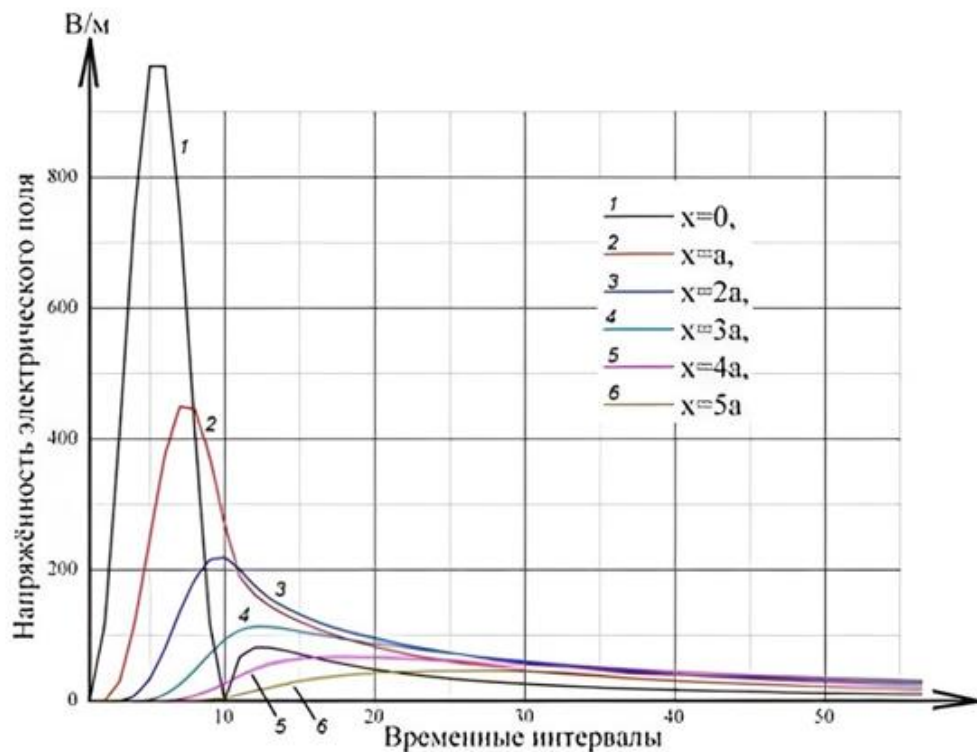


Рисунок 1.3 – Напряженность электрического поля синусоидального импульса внутри проводника в зависимости от временных интервалов

Также приведены расчеты при длительности импульса 10^{-9} с:

- $\Delta t = 10^{-10}$ с;
- $A = 2,384 \cdot 10^{-3}$ м;

- глубина проникновения ЭМП в проводник – 3,6 мкм.

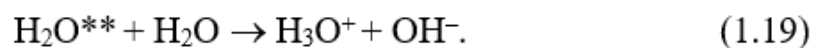
Далее сделан вывод, что при уменьшении длительности импульса уменьшается глубина проникновения.

В данной работе мы оцениваем воздействие наноимпульсов на воду, поэтому можем качественно оценить глубину проникновения импульса в водную среду, используя принятые допущения в работе [114]. Также предположим, что на проводящем электроде возбужден импульс с параметрами 1000 В/м и 1 нс. Выберем такой же интервал времени и водный раствор, у которого удельная проводимость равна 10^{-3} См/м. Интервал расстояния окажется равным $a = 0,632$ мкм, что на порядок больше, чем при использовании меди. Можно сделать вывод, что глубина проникновения в водной среде будет на порядок больше, чем в металле.

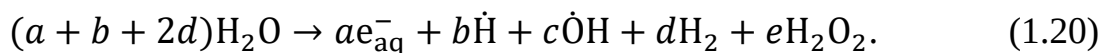
Проведенные эксперименты показали, что влияние НЭМИ зависит от вида, характеристики, состава самого обрабатываемого раствора. По приближенным расчётам величин импульсных полей наибольшие значения напряженности поля достигают 10^8 В/м. Далее рассмотрим импульсную радиолизную модель воздействия НЭМИ на воду.

1.7.1 Импульсная радиолизная модель

Для установления механизма воздействия НЭМИ на воду предлагается импульсная радиолизная модель на основе прохождения электронных пучков через воду [139–144]. Процесс разделяют на три этапа, которые подробно описаны в главе 5. Сначала происходит образование возбужденных и сверхвозбужденных молекул воды, далее – диссоциация образованных молекул в первом этапе:



В заключительном этапе происходит реакция между образовавшимися в начальных этапах радикалами и веществами в воде. В результате в воде образуются активные частицы первой группы: e_{aq}^- , $\dot{H}$, $\dot{OH}$, H_2^+ . Кроме этого, образуются продукты второй группы – молекулы H_2 и H_2O_2 . Все реакции, происходящие на протяжении этих трёх этапов, обычно представляют общим уравнением радиолита [139]:



Полученные элементы в результате прохождения трех этапов называют радикальными продуктами радиолита. Сокращенно можно записать эквивалентное соотношение:

$$a + b + 2d = c + 2e. \quad (1.21)$$

В этой же работе приведены средние значения выхода радикальных продуктов при поглощении 100 эВ энергии во время радиолита [140]:

$$g(e_{aq}^-) - 2,6...3;$$

$$g(\dot{H}) - 0,55...0,6;$$

$$g(\dot{OH}) - 2,7...2,95;$$

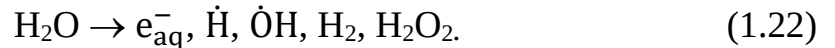
$$g(H_2O_2) - 0,68...0,8;$$

$$g(H_2) - 0,4...0,45.$$

Приходим к выводу, что изменение валентности некоторых элементов, образование новых соединений, изменение состава раствора при импульсном радиолите воды зависят главным образом от того, сколько энергии поглотила обрабатываемая среда, сколько образовалось гидратированных электронов и сколько их прореагировало с теми или иными элементами, находящимися в воде. Поэтому единственным контролируемым параметром импульса должна быть его энергия. Эта работа направлена именно на практическое применение воздействия НЭМИ на конкретные объекты: будь то питьевая или сточная вода, модельный раствор или пульпа из золотосодержащей руды.

1.7 .2 Импульсный разряд

Как было представлено выше, по мере диффузии продуктов радиолиза воды момент завершения реакций можно представить схемой:



Это означает, что при воздействии на воду НЭМИ в ней образуются новые носители заряда, соответственно, возникает увеличение электропроводности. Такой же процесс наблюдается при прохождении через воду электрического тока, который называется электрическим разрядом. Электрические разряды делятся:

- на самостоятельные, когда разряд может проходить без действия внешнего ионизатора;
- несамостоятельные, когда разряд протекает за счёт внешнего ионизатора.

Выделяют четыре основных вида самостоятельного разряда:

- коронный;
- дуговой;
- тлеющий;
- искровой.

Как было упомянуто выше, когда разряд протекает за счёт внешнего ионизатора, происходит несамостоятельный разряд. При слабых электрических полях ток, который протекает при разряде, подчиняется закону Ома. Когда поле достигает такой напряженности, при которой ток равен току насыщения, закон Ома не выполняется. При полях больше напряженности насыщения происходит лавина зарядов, вследствие чего наблюдается усиление разрядного тока.

Говоря об электрическом разряде, важно рассмотреть разрядники. Разрядник – это аппарат, предназначенный для ограничения перенапряжений

в электрических сетях и электротехнических установках. Из-за атмосферных разрядов, всплесков напряжения из-за коммутации аппаратов в электрических сетях появилась необходимость защиты изоляции, полупроводниковых приборов от короткого замыкания. Для защиты от перенапряжений начали использовать устройства, которые основаны на технологии искрового промежутка. Их и называли разрядниками.

Воздушный разрядник закрытого и открытого типа (трубчатый разрядник) представляет собой дугогасительную трубку из полимеров, к которой с разных концов закреплены электроды. Один электрод находится от линии на некотором расстоянии, от которого зависит напряжение срабатывания или пробоя; второй электрод заземляется. При появлении перенапряжений происходит пробой через зазор между линией и первым электродом, и через промежуток внутри трубки, в котором загорается дуга, в трубке возникает повышение давления. В воздушном разряднике открытого типа выброс плазменных газов осуществляется в атмосферу. Напряжение пробоя воздушных разрядников – более 1 кВ.

Газовые разрядники состоят из коаксиального элемента с разрядным промежутком между внутренним проводником и патроном, который выводится на землю. Как правило, газоразрядный элемент заключен в оболочку из стекла или керамики. Внутри оболочки находится газ аргон или неон, а с обеих сторон имеются электроды. При случаях перенапряжения разрядник как бы «поджигается», его сопротивление резко падает. Затем устанавливается напряжение 10 В, которое называют напряжением дугового разряда. Для отвода мощных импульсов перенапряжения на контур земли разрядник должен быть заземлен.

Распространенный вид разрядников – нелинейный ограничитель перенапряжений (ОПН). Их также используют для защиты изоляции электрооборудования подстанции и электрических сетей от скачков коммутационных и атмосферных перенапряжений. Данный вид разрядника при номинальной работе электроустановки пропускает ток, равный

миллиамперметру. При импульсных скачках напряжения сопротивление ограничителя мгновенно падает до единиц ома, происходит переход варисторов в проводящее состояние, обеспечивая ограничение дальнейшего нарастания перенапряжения. Далее происходит преобразование энергии импульса в тепловую энергию. Затем ограничитель переходит вновь в непроводящее состояние за счет окончания волны перенапряжения. Главным преимуществом ограничителя напряжения является то, что он мгновенно переходит в проводящее состояние.

Еще один вид разрядника – длинно-искровой, его работа основана на эффекте скользящего разряда. Он предотвращает переход импульсного перекрытия в силовую дугу тока промышленной частоты за счет обеспечения большой длины импульсного перекрытия по поверхности. За счет этого вероятность установления дуги короткого замыкания сводится к нулю – это и является главным преимуществом данного разрядника.

Следует вспомнить, что Генрих Герц в течение 20 лет в своих опытах использовал искровой и дуговой разряды для получения электромагнитных колебаний. Такие радиосигналы состояли из коротких или длинных посылок окрашенного шума. С развитием электроники были разработаны генераторы излучения синусоидальных волн. Одновременная передача и избирательный прием послужили важным фактором для развития применения синусоидальных волн. Однако вопрос использования не только синусоидальных волн был открыт. Как было сказано выше, первым, кто предложил в радиолокации применять несинусоидальные волны, был Н.Ф. Harmuth. В работе [112] он предложил использовать последовательность прямоугольных импульсов. В этой работе им была сформулирована основная теория и были предложены схемные решения. После реализации его схем и продолжительных исследований было обнаружено, что при таких жестких параметрах импульс не будет излучаться антенной, т. к. невозможно на практике получить импульс идеально прямоугольной формы – будут ненулевые фронты нарастания и спада. А при максимуме сигнала форма

сигнала будет иметь прямоугольный вид, что не создаст электромагнитного поля, т. к. производная тока по времени на этом участке будет равна нулю.

Первые практические работы и исследования в данной области были применены при создании радиолокационных станций с высокой разрешающей способностью. В работах [110, 113, 116] дана подробная теория излучения и приема импульсных полей. После продолжительных исследований и опытов в 1996 г. В.В. Крымским впервые в мире было предложено использование НЭМИ для воздействия на воду. Обработка веществ положительными или отрицательными однополярными импульсами тока при отсутствии в обрабатываемом веществе локального канала разряда является основным принципиальным отличием данного подхода [123–125]. При воздействии НЭМИ можно употреблять термин «полевое воздействие», т. к. на объект влияет другой род электромагнитного воздействия.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

В этой главе приведено описание исследовательского оборудования, а также методики измерений и результаты работ по измерению электрических характеристик электродной системы (ЭС).

2.1 Генераторы импульсов

В кратком виде история создания мощных наносекундных генераторов приведена в работе [109]. Существуют три подхода генерации импульсов.

1. Замыкание накопителя энергии емкости или линии на нагрузку. При этом накопитель, замыкатель и нагрузка подключаются последовательно.
2. Размыкание тока накопителя индуктивности или линии. При таком подходе накопитель, размыкатель и нагрузка подключаются параллельно.
3. Использование разных принципов, в том числе обострением импульсов нелинейными элементами.

1980-е гг. стали прорывными в области применения полупроводниковых диодов в качестве быстродействующих ключей. В 1979 г. И.В. Греховым и сотрудниками Санкт-Петербургского (Ленинградского) Физико-технического института было продемонстрировано формирование импульса с амплитудой напряжения не менее 1 кВ и фронтом менее 1 нс ДЗЛП. И уже через четыре года после этого ими же был представлен еще один способ получения высоковольтных импульсов с наносекундной длительностью с помощью дрейфовых диодов с резким восстановлением запирающих свойств (ДДРВ) со структурой $p-n-n_+$ [115,116]. Через десять лет появились работы В.С. Белкина и Г.И. Шульженко [117, 118] по применению ДДРВ с одним активным ключом. Особенность их ключей состоит в применении магнитных уплотнителей и формирователей на ДДРВ,

насыщающихся индуктивностей – как ключей обратного тока. Данное решение открыло возможность реализации многокаскадных ДДРВ формирователей. Это способствовало новому подходу сборки генераторов наносекундных импульсов.

Скорость изменения тока зависит от длительности переднего и заднего фронтов, которую можно определить отношением импульсного тока Δj на длительность фронта Δt . В свою очередь, величина напряженности электрического поля E определяется скоростью изменения тока $\Delta j/\Delta t$ [113]. Соответственно, величина $\Delta j/\Delta t$ служит критерием выбора генераторов, т. к. эффект воздействия НЭМИ зависит от напряженности электрического поля. Для получения большего эффекта следует использовать генераторы с большим импульсным током и малой длительностью фронта. Величина Δj зависит от амплитуды напряжения импульса и может быть управляемой.

Неопределенным считается параметр и вид нагрузки, т. к. нагрузка может быть разной. Если в качестве нагрузки выступает водный раствор, то нагрузка может быть либо ёмкостной, либо активно-ёмкостной – все зависит от количества растворенного вещества. Доказано, что воздействие НЭМИ меняет электропроводность и диэлектрическую проницаемость обрабатываемых водных растворов. Поэтому для исследований необходимо использовать генератор, который не зависел бы от свойств, вида и величины нагрузки.

Генераторы с заявленными параметрами в России изготавливают в четырёх организациях: Томске – Институте сильноточной электроники СО РАН, Новосибирское – Институте ядерной физики РАН, Екатеринбурге – Институте электрофизики РАН и Санкт-Петербурге – ЗАО «НПАО ФИД-ТЕХНОЛОГИЯ». В ранних работах В.В. Крымского были использованы генераторы GPN, ГНИ Института ядерной физики РАН и генератор ЗАО «НПАО ФИД-ТЕХНОЛОГИЯ». Отличительной чертой данных используемых генераторов от генераторов Института сильноточной электроники СО РАН (г. Томск) и Института электрофизики РАН (г. Екатеринбург) является

потребляемая мощность, которая составляет порядка 50 Вт, и малые габаритные размеры. Еще одним преимуществом генераторов фирмы «НПАО ФИД-ТЕХНОЛОГИЯ» является использование в схеме быстропереключающихся тиристоров с высоким КПД и длительностью импульсов менее 1 нс. Поэтому значительная часть данной работы посвящена изучению воздействия НЭМИ генераторов этой фирмы.

Принцип формирования высоковольтного импульса с длительностью менее одной наносекунды основан [153]:

- на формировании первичного импульса с параметрами: фронтом 3...5 нс и амплитудой напряжения порядка 4 кВ – за счёт обрыва обратного тока ДДРВ;

- обострении фронта и спада первичного импульса ДЗЛП, за счет чего получение на выходе импульса с параметрами: амплитудой напряжения более 2 кВ, фронтом нарастания и спада – менее 1 нс и менее 0,5 нс соответственно.

Здесь же [153] подробно рассмотрена работа формирователя импульса. Для достижения поставленной цели на ДДРВ подают импульс прямого тока (J_+) в течение времени, обозначаемого t_+ , по окончании этого времени – импульс обратного тока (J_-) в течение времени, обозначаемого t_- . Если продолжительность времени пропускания прямого и обратного тока через ДДРВ меньше времени неосновных носителей в базе ДДРВ, то это приводит к резкому восстановлению запирающих свойств, тогда справедливо равенство

$$\int_0^{t_+} J_+ dt = \int_0^{t_-} J_- dt. \quad (2.1)$$

Обрыв восстановления запирающих свойств ДДРВ происходит при соблюдении условий:

- значение обратного тока больше значения прямого тока;
- значение обратного тока не равно нулю;
- количество зарядов, прошедших через диод при прямом направлении, равно количеству зарядов, прошедших через диод при обратном направлении.

При выполнении этих условий на диоде формируется импульс, параметры которого зависят от суммарных значений нагрузки данного

полупроводника [153]. Временная диаграмма работы генератора представлена на рисунке 2.1.

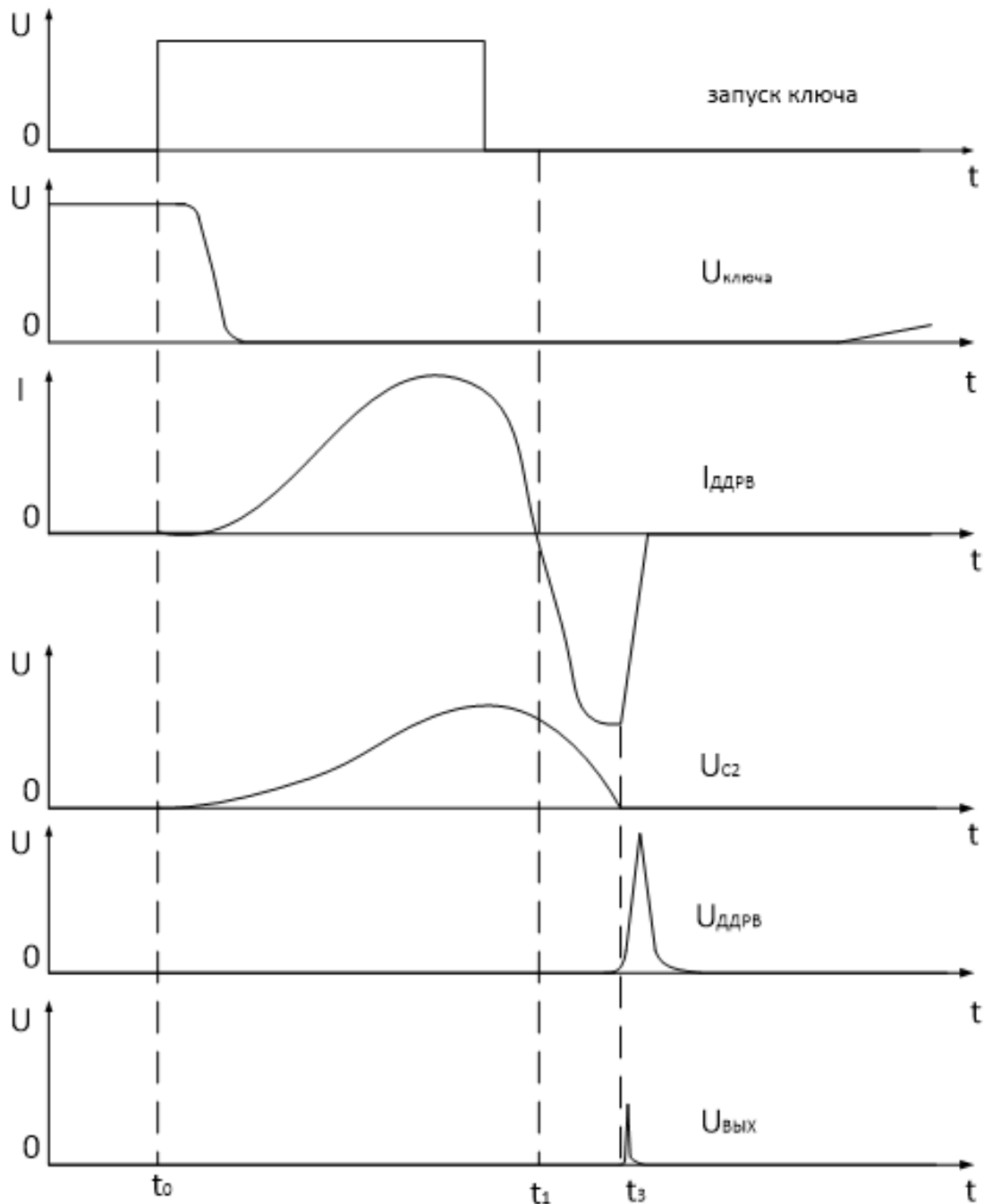


Рисунок 2.1 – Временная диаграмма работы генератора

В начальный момент времени происходит зарядка емкости $C1$ до E_{Π} [153]. Током $L1$ можно пренебречь в промежутке времени $t_0 - t_3$, а ток $L3$ имеет малое значение в промежутке $t_0 - t_1$, а $C1$ больше $C2$. В промежутке времени от t_0 до t_1 ток заряда $C2$ является током разряда $C1$, одновременно ток $C1$ является прямым током $D1$. В точке t_1 :

$$t_1 = \pi \sqrt{L_2 \frac{c_1 \cdot c_2}{c_1 + c_2}} \sim \pi \sqrt{L_2 \cdot C_2}. \quad (2.2)$$

Функциональная схема генератора наносекундных импульсов приведена на рисунке 2.2.

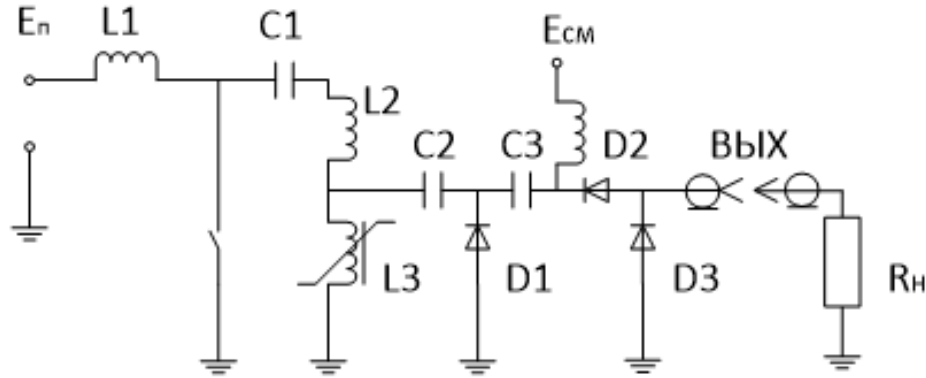


Рисунок 2.2 – Функциональная схема генератора

Ток через $D1$ меняет знак, $C2$ при этом заряжен до максимальной величины. В это же время насыщается дроссель $L3$. После выполнения определенных условий при полном заряде $C2$ и в момент времени t_2 происходит обрыв обратного тока $D1$ [153]. Если допустить упрощение, представив включенным только R_H , то получим эквивалентную схему при этапе формирования импульса ДДРВ (рисунок 2.3).

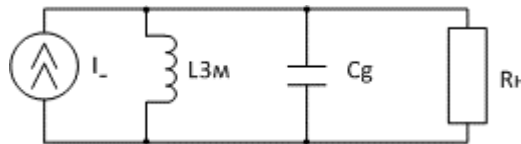


Рисунок 2.3 – Эквивалентная схема

Импульс ДДРВ имеет конусоидальный фронт с длительностью нарастающего фронта

$$\tau_{\text{фр}} \approx \sqrt{L_{3M} \cdot c_g} \quad (2.3)$$

и с длительностью экспоненциального спада $\tau_{\text{сп}} \sim c_g \cdot R_H$. За счет того, что добротность схемы обычно меньше единицы, амплитуду напряжения импульса вычисляют по формуле

$$U_{\text{имп}} = J_-(t_2) \frac{R_H \cdot \rho}{R_H + \rho}, \quad (2.4)$$

где $\rho = \sqrt{\frac{L_3}{c_g}}$. На практике все эти параметры импульса приближенные, т. к.

есть неточные величины:

- время запираания ДДРВ не всегда много меньше значения $\tau_{\text{фр}}$;
- c_g, L_3 являются нелинейными.

Если за c_g принять емкость диода при обратном смещении примерно $0,5 U_{\text{имп}}$, параметры выполняются с точностью 30...50 %. На рисунке 2.4 представлена форма напряжения первичного и выходного импульсов.

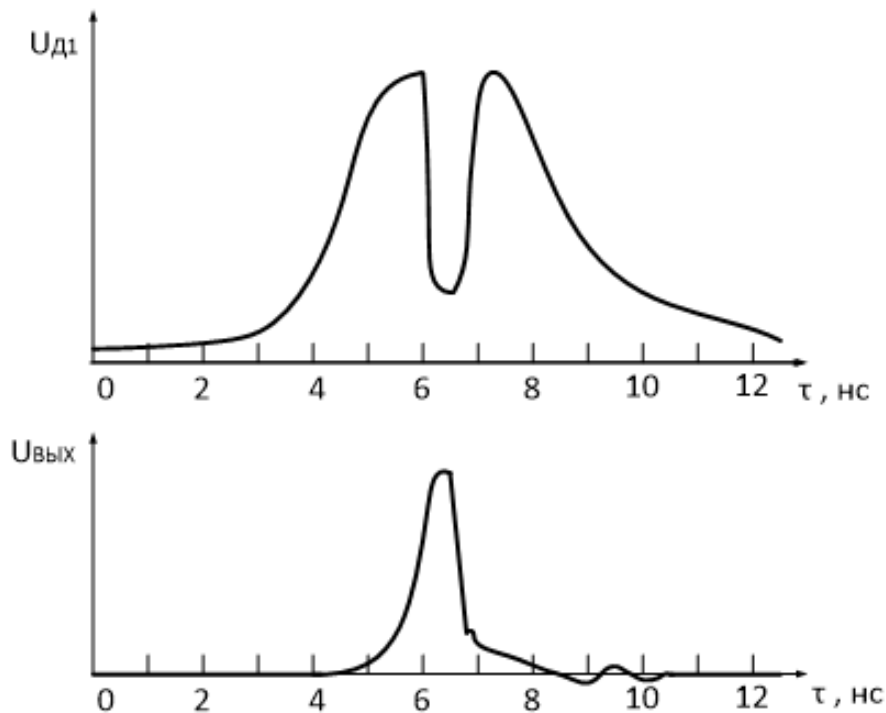


Рисунок 2.4 – Формы напряжения первичного и выходного импульсов

На временных диаграммах (рисунок 2.1) в качестве $D2$ и $D3$ используются диоды с задержкой лавинного пробоя (ДЗЛП). На диод $D2$ подается смещение, близкое к величине его лавинного пробоя $E_{\text{см}} \sim 0,5...0,9U_{\text{л}}$. От $t_2 - t_3$ на этапе задержки пробоя $D2$ нагрузка R_H отсутствует, добавляется емкость $D2$, которая меньше емкости ДДРВ. Можно сделать вывод, что качественно картина не меняется. После пробоя $D2$ на R_H появляется импульс с более крутым фронтом, чем у первичного.

На интервале $t_3 - t_4$ происходит этап задержки лавинного пробоя, $D3$ закорачивает выход и формирует спад выходного импульса. На интервале $t_3 -$

t_5 во время формирования выходного импульса появляется провал за счет подключения нагрузки и закорачивания диодом $D3$. Принципиальная схема генератора приведена на рисунке 2.5.

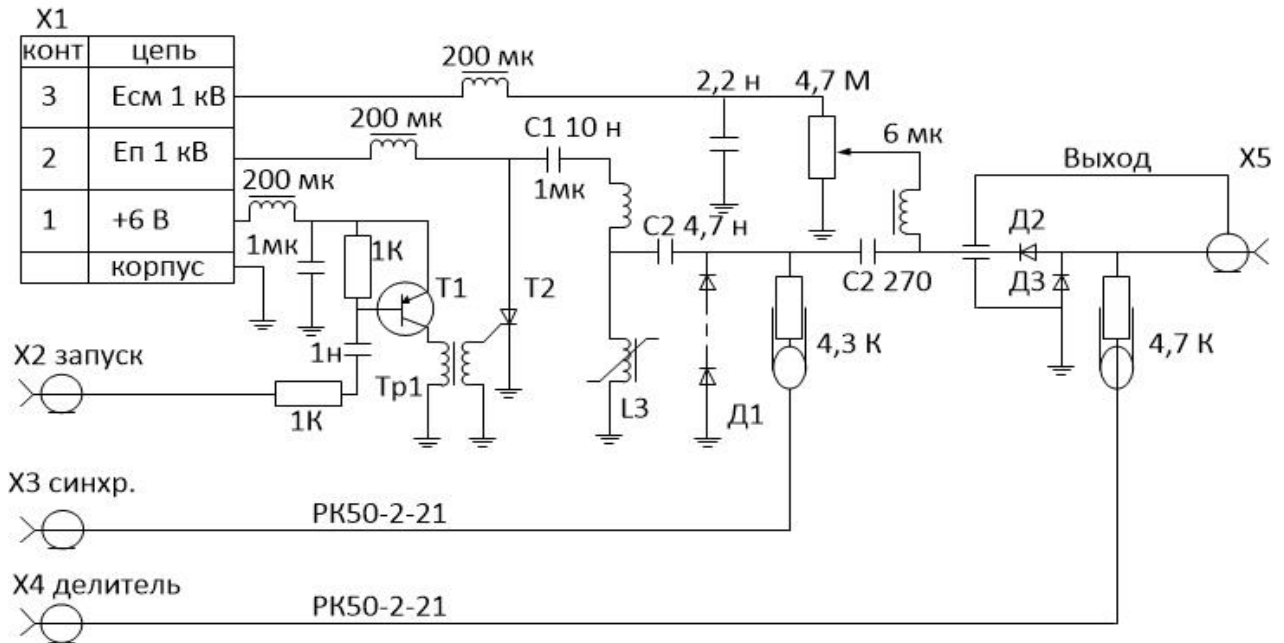


Рисунок 2.5 – Принципиальная схема генератора НЭМИ

Как было сказано выше, в данной работе используется генератор фирмы ЗАО «НПАО ФИД-ТЕХНОЛОГИЯ» (г. Санкт-Петербург), который имеет регулируемую амплитуду 7...15 кВ, регулируемую частоту повторения 100...1000 Гц. Длительность импульса – 0,6 нс, длительность переднего фронта – 0,15 нс. Форма импульса треугольная. Полярность положительная. Никаких изменений в схему генератора мы не вносим. Реальный импульс генератора представлен на рисунке 2.6. Он был получен с помощью осциллографа HP54750A с преобразователем HP83483A (20 ГГц). Для снятия характеристик сигнала использовались делители Barth с разрешением 50 пс и делители Weinschell с разъемом SMA с полосой пропускания 18 ГГц. Генератор работал на согласованную нагрузку 50 Ом. Проведённые авторами измерения параметров импульсов генератора на длительностях 5 нс и амплитудах 6 кВ на осциллографе C1-75 показали, что при подключении реальной нагрузки в виде водной среды форма импульса генератора практически не изменяется.

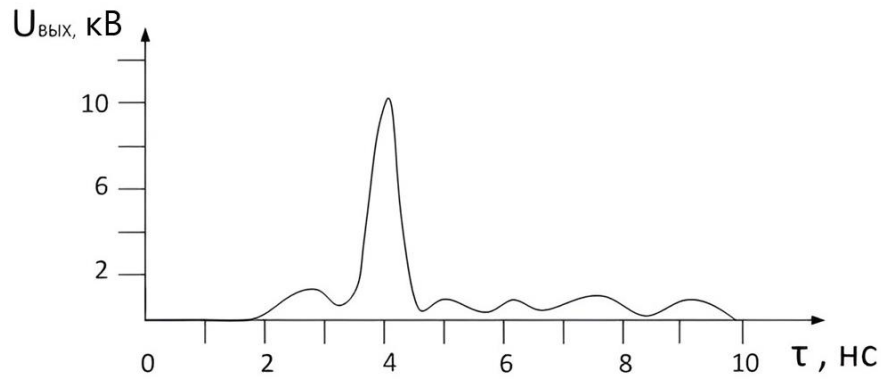


Рисунок 2.6 – Осциллограмма импульса генератора НЭМИ

В работах В.В. Крымского [113] выявлены граничные условия применения наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ) при воздействии на различные вещества:

1. При длительности НЭМИ менее 1 нс выявлены изменения различных свойств водных растворов, однако при длительности импульса более 2 нс уже не происходит явного эффекта воздействия. По этой причине В.В. Крымский приходит к выводу о том, что рабочий диапазон длительности импульса, при котором наблюдается явный эффект воздействия НЭМИ, лежит в районе 1 нс.

2. Во время исследования воздействия НЭМИ на воду диапазон амплитуд сигналов изменялся от 2 до 15 кВ. Установлена условная минимальная отметка, равная 5 кВ, т. к. заметный эффект фиксируется только на более высоких уровнях.

Приблизительно можно оценить мощность в одном импульсе и среднюю мощность. При амплитуде напряжения 15 кВ и нагрузке 50 Ом импульсный ток $I_{\text{имп}}$ будет равен:

$$I_{\text{имп}} = \frac{U_{\text{амп}}}{R_{\text{нагр}}} = \frac{15000}{50} = 300 \text{ А.} \quad (2.5)$$

Приблизительно импульсную мощность $P_{\text{имп}}$ можно определить:

$$P_{\text{имп}} = U_{\text{амп}} \cdot I_{\text{имп}} = 15000 \cdot 300 = 4,5 \text{ МВт.} \quad (2.6)$$

Тогда средняя мощность $P_{\text{ср}}$ при $\tau_{\text{имп}} = 1 \text{ нс}$, $f = 1000 \text{ Гц}$:

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{имп}} \cdot \tau_{\text{имп}} \cdot f = 4,5 \cdot 10^6 \cdot 10^{-9} \cdot 1000 = 4,5 \text{ Вт.} \quad (2.7)$$

При данных параметрах генератора энергия одного импульса определяется:

$$W_{\text{имп}} = P_{\text{имп}} \cdot \tau_{\text{имп}} = 4,5 \cdot 10^6 \cdot 10^{-9} = 4,5 \text{ мДж.} \quad (2.8)$$

Поэтому при воздействии НЭМИ на вещества не наблюдается заметное повышение температуры. Следует ли использовать импульсы с большой энергией, утверждать сложно, этот вопрос требует дальнейшего исследования.

2.2 Электродная система НЭМИ

Для эффективного использования НЭМИ стояла задача конструировать соответствующие разрядники для решения тех или иных задач. При излучении несинусоидальных волн (НСВ) порядка 1–10 нс вместо термина «разрядник» введем термин «излучатель-электрод», т. к. в нашем случае нет локального разряда в привычном его смысле. Для оценки свойств излучателей НСВ необходимо сравнить основные используемые характеристики – это модуль, фаза входного сопротивления и коэффициент стоячей волны напряжения $k_{\text{ст}}$. Также рассмотрим формы излучаемого и принимаемого сигналов.

В работе [120] рассмотрены некоторые виды излучателей-электродов и приведены их электрические характеристики. Приведем в качестве примера некоторые из них. Первым рассмотрим симметричный вибратор с широкими плечами. Известны разные специальные конструкции вибраторных антенн с широкой полосой частот, в частности диполь Надененко или коническая форма плеча. Антенной называем устройство, которое состоит из узла питания, распределительного устройства и излучателя-электрода электромагнитных волн. Самый простой вид антенны – плоский вибратор с треугольной формой плеч. В работе использовался специальный вибратор с длиной плеча 800 мм и шириной на конце 150 мм. Длительность подаваемого импульса – 7 нс. На рисунке 2.7 представлена зависимость $k_{\text{ст}}$ от частоты. На

рисунке видим четкую область резонансных частот, которая соответствует полуволновой длине. За счет расширения плеч расширена и резонансная кривая.

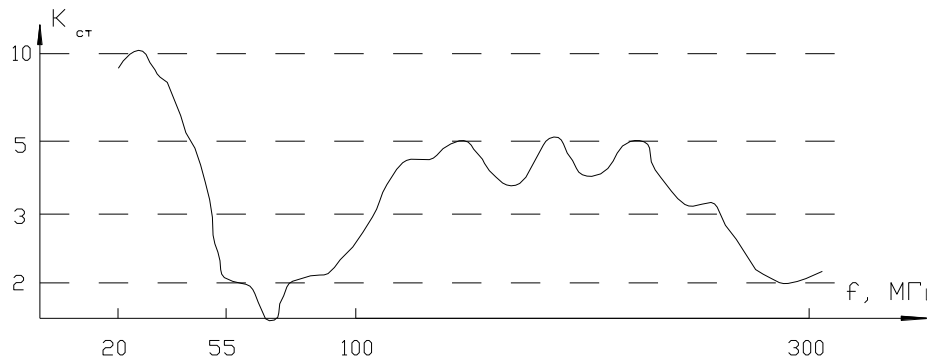


Рисунок 2.7 – График зависимости $k_{ст}$ от частоты

Зависимость напряжения на вибраторе по времени представлена на рисунке 2.8.

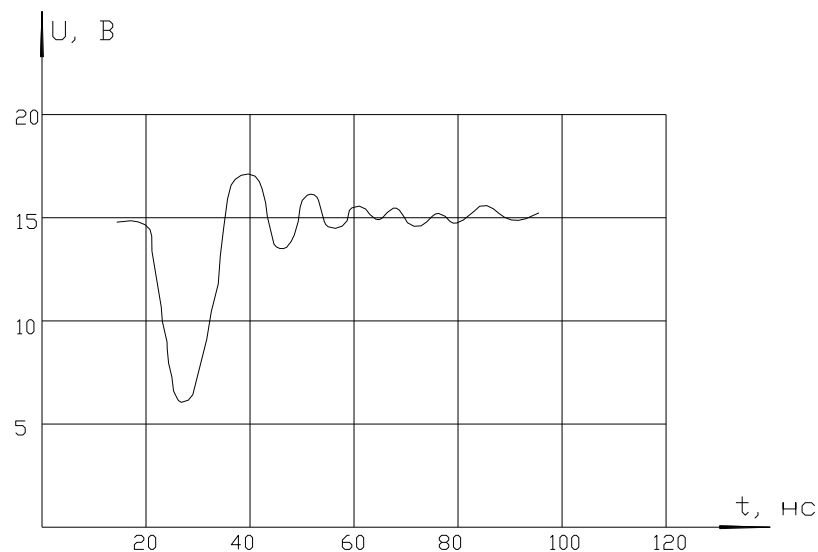


Рисунок 2.8 – Форма напряжения на принимающем вибраторе

По рисунку приходим к выводу, что импульс искажается мало, но после него наблюдаются длительные послеимпульсные колебания, частота которых близка к резонансной частоте вибратора.

Второй вид антенн – рупорные. Для проведения экспериментов использовали рупорную антенну П6-23. Рабочий диапазон частот – 1,0...12,0 ГГц. Величина $k_{ст}$ в диапазоне – не более 1,5. На рисунках 2.9, 2.10 представлены зависимости $k_{ст}$ антенны в диапазоне частот 20...1200 МГц.

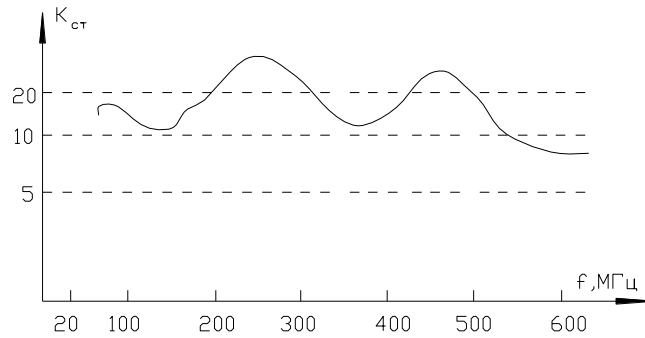


Рисунок 2.9 – Зависимости $k_{ст}$ антенны в диапазоне частот 20...600 МГц

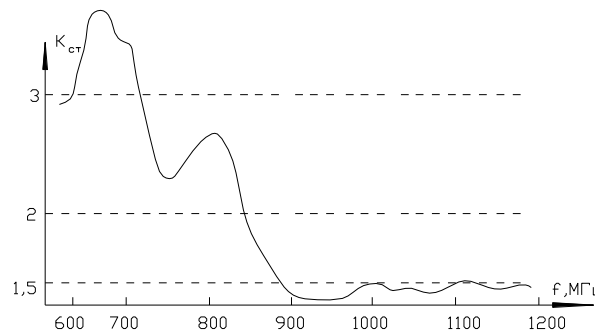


Рисунок 2.10 – Зависимость $k_{ст}$ антенны в диапазоне частот 600...1200 МГц

По графикам зависимостей $k_{ст}$ видно:

- при частотах 20...600 МГц у антенны большой коэффициент $k_{ст}$;
- антенна имеет линейную поляризацию;
- плоскость поляризации проходит через ось рупора параллельно узким сторонам раскрыва.

Также в работе представлены измерения диаграммы направленности антенны. Использовали генератор ФНИ 1,5/2,5 со следующими параметрами:

- амплитуда выходного сигнала – 2,5 кВ;
- время нарастания импульса (от 0,1 до 0,9 амплитуды) – 0,7 нс;
- длительность импульса (по уровню 0,5) – 1,5 нс;
- мощность в импульсе – 120 кВт.

Приемная и передающая антенны – П6-23А, высота подъема – 2 м, расстояние между антеннами – 4,5 м. Измерение принятых сигналов осуществлялось осциллографом С1-75. Форма сигнала на контрольном

выходе генератора представлена на рисунке 2.11. Форма сигнала на выходе приемной ферритовой антенны показана на рисунке 2.12.

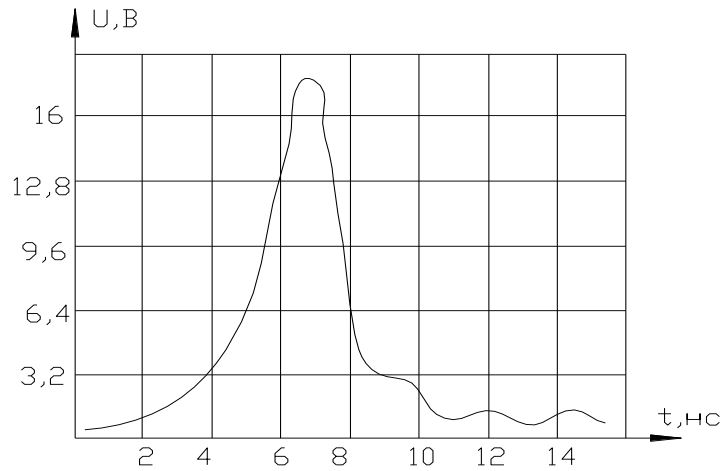


Рисунок 2.11 – Форма сигнала на контрольном выходе

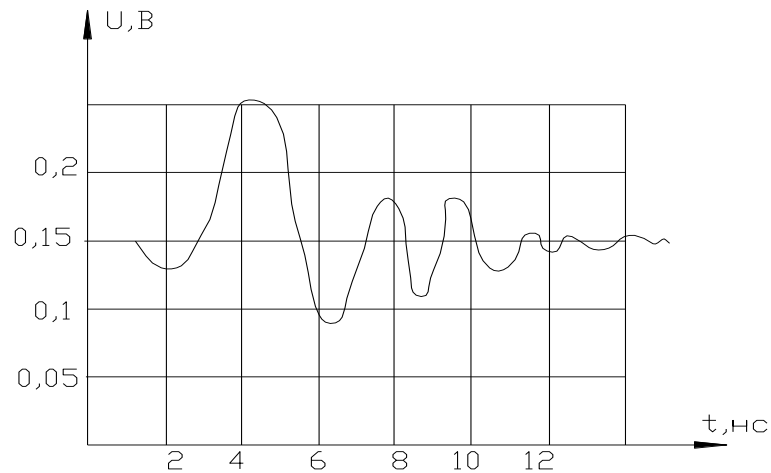


Рисунок 2.12 – Форма сигнала на выходе приемной ферритовой антенны

По полученным формам сигнала видим, что формы сигнала значительно искажаются и имеются послеимпульсные колебания длительностью до 10 нс.

В таблице 2.1 приведена зависимость амплитуды принятого сигнала от расстояния между приемной и передающей антеннами П6-23А.

Таблица 2.1 – Зависимость амплитуды принятого сигнала от расстояния

$r, м$	1	2	4,5
$U, В$	6	3,6	2

После сравнения излученных и принятых форм напряжений пришли к выводу, что на излучающей антенне основное уменьшение амплитуды с 2,5 кВ

до единиц вольт на приемной происходит за счет свойств антенн, а не за счет расстояния между антеннами.

Приходим к выводу, что для обработки НЭМИ важны:

- выходные параметры генератора, т. к. именно от него зависит, какую энергию получит обрабатываемая среда;
- коэффициент отражения или коэффициент стоячей волны, от которых зависит, какая часть энергии подводится к ЭС.

ЭС НЭМИ должны соответствовать следующим требованиям:

- пространственно-временная импульсная характеристика должна быть равномерной, т. к. отсутствие равномерности этой характеристики приводит к появлению осцилляций в импульсе, что вызовет затягивание переднего и заднего фронтов;
- возможность работы излучателя-электрода в водной среде;
- создание высокой напряженности поля в ограниченном пространстве.

При выполнении требования по габариту необходимо найти золотую середину», т. к. при уменьшении расстояния между активными частями излучателя-электрода возрастает напряженность поля между ними. Наряду с уменьшением его поверхности происходит уменьшение излучения, которое приводит к снижению КПД.

При выборе материала излучателя-электрода для обработки НЭМИ водной среды руководствуемся двумя факторами:

- характер среды, на которую мы воздействуем. При обработке пульпы из золотосодержащей руды с цианидом натрия использовали графитовый электрод и стальную проводящую ёмкость;
- применение такого материала (медный, посеребренный, стальной с никелевым покрытием), содержание ионов которого мы не оцениваем в пробе после обработки модельных растворов, питьевых и сточных вод. При оценке эффекта воздействия НЭМИ на несколько элементов в воде, модельном растворе для чистоты эксперимента и исключения выхода в обрабатываемый раствор ионов металлов электродов использовали

графитовый электрод. На рисунке 2.13 представлена конструкция электродной системы.

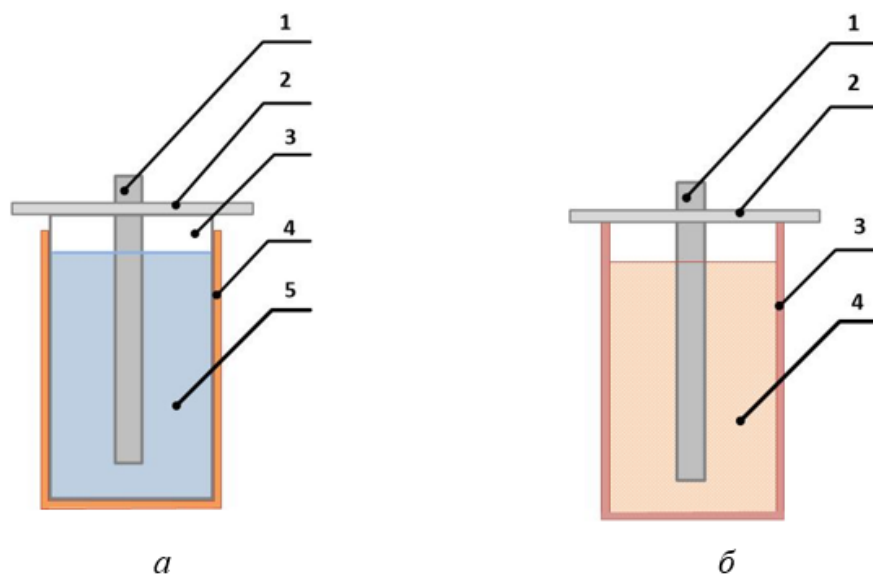


Рисунок 2.13 – Электродная система: *а* – ЭС «излучатель-электрод в стеклянной колбе»: 1 – пусковой излучатель-электрод; 2 – фиксатор; 3 – колба из химически стойкого стекла; 4 – медная фольга – заземленный излучатель-электрод; 5 – обрабатываемый раствор; *б* – ЭС «излучатель-электрод в проводящей ёмкости»: 1 – пусковой излучатель-электрод; 2 – фиксатор; 3 – металлический сосуд – заземленный излучатель-электрод; 4 – обрабатываемая пульпа

В данном исследовании использовался излучатель-электрод, представляющий собой цилиндрическую конструкцию из меди, стали или стержень с серебряным покрытием. Он помещается в емкость, проводящую электрический ток, изготовленную из коррозионностойкой стали (например, марки 08X18H10, диаметром 95 мм и высотой 110 мм), или располагается в стеклянной емкости (диаметр 80 мм и высота 150 мм), экране из проводящей металлической фольги. К центральной жиле провода подключается пусковой излучатель-электрод, а оплетка соединяется с заземляющим металлическим экраном. Соотношение между диаметром электрода и емкости должно соответствовать определенным требованиям, зависящим от характеристик обрабатываемой жидкости. В результате формируется электродная система, аналогичная коаксиальной линии.

В работе приведены результаты обработки НЭМИ пяти сред: дистиллированной, питьевой, сточной воды, модельных растворов и пульпы из золотосодержащей руды. Для каждой обрабатываемой среды опытным путем подбирались излучатели-электроды с круглым сечением:

- из графита диаметром 2,5 мм, длиной 120 мм;
- посеребренного стержня диаметром 18 мм, длиной 120 мм;
- меди диаметром 5 мм, длиной 120 мм;
- стального стержня с никелевым покрытием диаметром 1,5 мм, длиной 115 мм,
- медной спирали диаметром 0,4 мм, намотанной на стержень из пластмассы диаметром 6,8 мм, длиной 75 мм. В конструкции предусмотрено около 160 витков.

Для обработки больших объемов жидкости используется установка, приведенная на рисунке 2.14.



Рисунок 2.14 – Фотография установки проточного типа

Основные технические характеристики:

1. Тип исследуемой жидкости – вода, неагрессивные углеводороды, растворы солей.
2. Максимальная температура жидкости – 50 °С.

3. Диапазон изменения массового расхода жидкости – 0...6 л/мин.
4. Максимальное давление подачи жидкости – 0,3 МПа.
5. Максимальный объем жидкости в расходном баке – 40 л.
6. Максимальная потребляемая электрическая мощность – 0,5 кВт.
7. Масса установки в сборе (без жидкости) – 60 кг.
8. Габаритные размеры установки – 1400×700×2600.

Установка состоит из нескольких основных узлов, соединенных между собой:

- блок подачи, учета и распределения жидкости;
- генератор импульсов;
- бак обработки;
- расходный и приемный баки;
- электрощит управления;
- рама.

Электрощит управления установлен на раме и смонтирован в металлическом шкафу. В нем помещен автомат защиты, тумблеры включения насоса и генератора импульсов, а также индикаторы их включения. Электрическая схема установки приведена на рисунке 2.15.

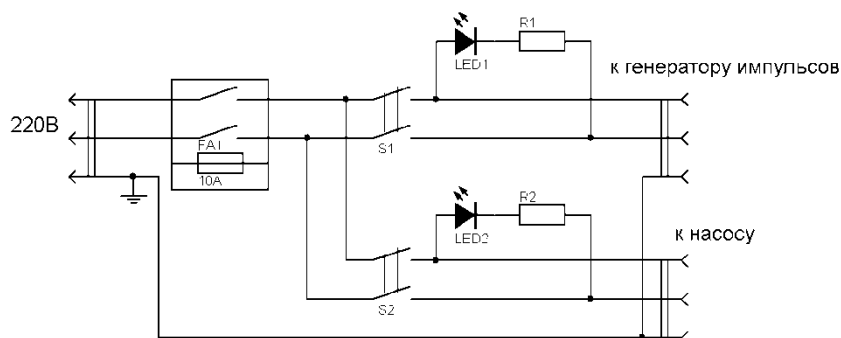


Рисунок 2.15 – Электрическая схема установки

Вторая ЭС предназначена для переработки пульпы, содержащей благородные металлы в рудном материале. Конструкция представляет собой прямоугольную емкость из стали с верхней съемной пластиной, установленной на диэлектрических бочонках (рисунок 2.16). Основной

элемент ёмкости функционирует как заземленный излучатель-электрод, подключенный к оплётке кабеля от генератора импульсов. Съемная пластина выполняет роль пускового излучателя-электрода, соединенного с центральной жилой кабеля. Более подробная информация по этой теме представлена в разделе 4.5.

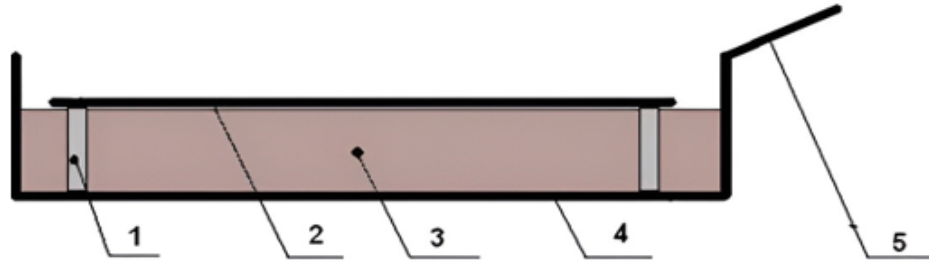


Рисунок 2.16 – ЭС для обработки пульпы из золотосодержащей руды: 1 – диэлектрический бочонок; 2 – пусковой излучатель-электрод; 3 – обрабатываемая пульпа; 4 – заземленный излучатель-электрод; 5 – загрузочный узел

Основной частью ЭС является пусковой излучатель-электрод, представляющий из себя стержень или пластину из проводящего материала. Можно различить элементарные излучатели по их размерам в сравнении с длиной излучаемой волны, например, электрический диполь Герца, магнитный диполь и элемент Гюйгенса – элементарная излучающая площадка. В нашем же случае отсутствует понятие длины волны [121]. Поэтому вводится соотношение обычной длительности импульса с аналогичным по смыслу понятием пространственной длительности импульса:

$$\tau_{\text{ПР}} = c \tau_{\text{И}}, \quad (2.9)$$

где $\tau_{\text{ПР}}$ – пространственная длительность импульса;

$\tau_{\text{И}}$ – фактическая длительность импульса.

При сравнении наибольшего размера излучателя-электрода D и пространственной длительности импульса $\tau_{\text{ПР}}$ размеры можно разделить на три вида:

$$1) D \leq \tau_{\text{ПР}};$$

$$2) D \cong \tau_{\text{ПР}};$$

$$3) D \gg \tau_{\text{ПР}}.$$

Входное сопротивление $R_A(t)$ для ЭС НЭМИ определяют в виде отношения:

$$R_A(t) = \frac{U_A(t)}{I_A(t)}, \quad (2.10)$$

где $U_A(t)$ – временная зависимость напряжения на зажимах излучателя; $I_A(t)$ – временная зависимость тока на входе излучателя-электрода. Соотношение между $R_A(t)$ и $\dot{z}_A$ можно установить через преобразование Фурье:

$$R_A(t) = \text{Re} \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \dot{z}(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \right). \quad (2.11)$$

Входное сопротивление определяется не только конструкцией, но и временной зависимостью возбуждающего сигнала. В практике удобно использовать среднее сопротивление $R_{\text{ср}}$, которое определяется через усредненные значения тока и напряжения во время импульса:

$$R_{\text{ср}} = \frac{\int_0^{\tau_{\text{и}}} U_A(t) dt}{\int_0^{\tau_{\text{и}}} I_A(t) dt}, \quad (2.12)$$

где $[0, \tau_{\text{и}}]$ – временной интервал существования сигнала.

Из-за затруднения непосредственного измерения токов и напряжений для оценки входного сопротивления используют понятие «коэффициент отражения» $\dot{p}$ [121]:

$$\dot{p} = \frac{\dot{z}_A - z_0}{\dot{z}_A + z_0}, \quad (2.13)$$

где z_0 – волновое сопротивление волноводной линии.

Величина $\dot{p}$ для наносекундных импульсов является действительной p , которую определяют как отношение амплитуды напряжений падающего $E_{\text{пад}}$ и отраженного импульса $E_{\text{отр}}$:

$$p = \frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}}. \quad (2.14)$$

КПД ЭС η наносекундных импульсов определяется как отношение средней излученной мощности $P_{\Sigma CP}$ за время существования импульса к средней подводимой мощности P_A :

$$\eta = \frac{P_{\Sigma CP}}{P_A}, \quad (2.15)$$

где P_A определяют через усредненные величины:

$$P_A = \frac{1}{\tau_{и}^2} \int_0^{\tau_{и}} U_A(t) dt \cdot \int_0^{\tau_{и}} I_A(t) dt. \quad (2.16)$$

Однако следует отметить, что измерение напряжения, тока и мощности во временной области является сложной задачей.

Основными характеристикам ЭС являются электрические и пространственные. К электрическим характеристикам относятся: коэффициент отражения, волновое, продольное сопротивление и сопротивление нагрузки, к пространственным – диаграммы направленности, коэффициент усиления и поляризационные характеристики. Важным энергетическим показателем является согласованность генератора импульсов и ЭС. По этому показателю можно судить, сколько энергии подводится к обрабатываемой среде от генератора. Далее приведены результаты по измерению электрических характеристик ЭС для излучения НЭМИ.

2.3 Методики измерений

При проведении экспериментов регистрировались: температура окружающей среды, морфологический состав осадка и электрода, а также следующие параметры раствора и пульпы: концентрация веществ, pH, температура до и после обработки.

2.3.1 Определение характеристик раствора и концентрации веществ в нем

В экспериментах проводились измерения рН воды иономером И-130 (диапазон измерения 0...19,99 рН, абсолютная ошибка измерений $\pm 0,2$ рН). Измерение температуры воздуха и раствора (пульпы) проводилось с использованием ртутных термометров, погрешность измерений составляет не более 0,5 °С. Анализ концентрации растворенных веществ проводился на атомно-абсорбционном спектрометре «Спектр-5». Относительная погрешность измерения содержания металлов в растворах, не более:

- железа – 5 %;
- меди – 8 %;
- цинка – 15 %;
- никеля – 20 %.

Измерения проводились в сертифицированной лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения «Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии «Челябинский» (ФГБУ «Челябинскагрохимрадиология»).

2.3.2 Определение концентрации драгоценных металлов в пульпе

Измерение концентрации драгоценных металлов в пульпе проводилось в сертифицированной лаборатории на базе АО НПФ «Башкирский золотодобывающий комбинат» с помощью атомно-абсорбционного спектрометра «Спектр-5» («Союзцветметавтоматика», спектральный диапазон (в зависимости от типа фотоумножителя) – 185...900 Нм, основная относительная погрешность при измерении оптической плотности на длине волны 324,8 нм во всем диапазоне измеряемых концентраций – не более 5 %). В таблице 2.2 представлена абсолютная погрешность измерений содержания золота и серебра.

Таблица 2.2 – Погрешность измерений содержания золота и серебра

мг/л	1,00	3,00	5,00	10,00
Δ	0,08	0,20	0,30	0,50

2.3.3 Определение морфологического состава электрода и осадка в растворе после обработки

Определение морфологических особенностей образовавшихся соединений до и после обработки НЭМИ было произведено на электронном микроскопе *JEOL JSM 648 CLV* с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа в учебной научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии на базе кафедры «Материаловедение и физико-химия материалов» Южно-Уральского государственного университета (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ)) и на комплексе сканирующей электронной микроскопии *Jeol JSM 700IF*, *EDS Oxford INCA X-max 80*, *WDS Oxford INCA WAVE*, *EBSD* и *HKL*, который находится в научно-образовательном центре «Нанотехнологии», ЮУрГУ (НИУ).

2.4 Измерение волнового сопротивления электродной системы

Для измерения электрических характеристик ЭС (рисунок 2.17) был использован малогабаритный импульсный рефлектометр пикосекундного диапазона – измеритель неоднородности линий Р5-15.

В состав прибора Р5-15 входит: измеритель неоднородности линий Р5-15 с блоком питания, генератор к Р5-15, смеситель к Р5-15. Установка работает по методу импульсной рефлектрометрии: в линию посылается импульс напряжения, который, распространяясь, возбуждает в отдельности каждый участок линии.



Рисунок 2.17 – Экспериментальная установка для измерения электрических характеристик электродной системы

Величина и характер неоднородности волнового сопротивления характеризуются коэффициентом отражения Γ , который при импульсных измерениях в общем случае равен отношению спектральных функций отраженного и зондирующего сигналов в месте неоднородности [122]:

$$\Gamma = \frac{S_{\text{ОИ}}}{S_{\text{ЗИ}}} = \frac{z l_x - W}{z l_x + W}, \quad (2.18)$$

где $S_{\text{ОИ}}$, $S_{\text{ЗИ}}$ – спектральные функции отраженного и зондирующего сигналов, определяемые их формой в месте неоднородности; $z l_x$ – входное сопротивление линии в месте неоднородности; W – номинальное волновое сопротивление.

Если форма отраженного сигнала близка к форме зондирующего сигнала, то коэффициент отражения равен отношению амплитуд отраженного и зондирующего сигналов [122]:

$$\Gamma = \frac{A_{\text{ОИ}}}{A_{\text{ЗИ}}}, \quad (2.19)$$

где $A_{\text{ОИ}}$, $A_{\text{ЗИ}}$ – амплитуды отраженного и зондирующего сигналов.

Зондирование линии единичным перепадом напряжения позволило исследовать и измерить распределенные и сосредоточенные неоднородности, определить их характер (активный, индуктивный, емкостный) и измерить

малые неоднородности в линиях с незначительным затуханием при исследовании переходных характеристик.

Для анализа совместимости работы генератора импульсов с ЭС рефлектометр Р5-15 подключали к ЭС через кабель РК50-3-210 длиной 0,4 м. В эксперименте использовался сигнал с перепадом напряжения 20 мВ, имеющий «ступенчатую» форму.

Зондирование ЭС единичным перепадом напряжения позволило исследовать и измерить распределенные и сосредоточенные неоднородности, определить их характер (активный, индуктивный, емкостный). По результатам измерений было выявлено, что электрические характеристики близки для всех четырех используемых электродов, поэтому приведем рефлектограммы (таблица 2.3) только для разных сред и двух разных ЭС.

По полученным видам рефлектограмм был оценен характер неоднородности для разных систем и рассчитаны коэффициент отражения, волновое, продольное сопротивление и сопротивление нагрузки.

В рефлектограммах наблюдалось два вида перепада напряжения, т. к. в нашем случае форма отраженного сигнала была близка к форме зондирующего сигнала, коэффициент отражения p определяли по формуле [122]:

$$p = 0,01 \cdot k \cdot n, \quad (2.20)$$

где k – установленное положение переключателя коэффициента отражателя; n – число делений вертикальной шкалы от вершины зондирующего перепада до вершины отраженного перепада.

Волновое сопротивление W определяли по формуле [122]:

$$W = 50 \frac{1+0,01 \cdot k \cdot n}{1-0,01 \cdot k \cdot n}. \quad (2.21)$$

Таблица 2.3 – Рефлектограммы электродных систем для разных сред между излучателями-электродами

Вещество в ЭС	ЭС «излучатель-электрод в стеклянной колбе»	ЭС «излучатель-электрод в проводящей ёмкости»
Воздух		
Дистиллированная вода		
Модельный раствор с солями CuSO ₄ и NiSO ₄ концентрацией 5 г/л		
Пульпа из золотосодержащей руды		

Для определения величины неоднородности вводим дополнительное поправочное число делений n' из-за несогласованности выхода прибора с измеряемой нагрузкой [122]:

$$n' = n \frac{(W+50)^2}{200 \cdot W}. \quad (2.22)$$

Продольное сопротивление и сопротивления нагрузки определили уже по откорректированному коэффициенту [122]:

$$R_H = W \frac{1+0,01 \cdot k \cdot n'}{1-0,01 \cdot k \cdot n'}, \quad (2.23)$$

$$R_{\Pi} = W \frac{2 \cdot 0,01 \cdot k \cdot n'}{1-0,01 \cdot k \cdot n'}. \quad (2.24)$$

Как видно из рефлектограмм, формы зондирующего и отраженного

сигналов практически идентичны для обеих ЭС. В таблице 2.4 представлены снятые показатели и рассчитанные электрические характеристики ЭС.

Таблица 2.4 – Электрические характеристики электродной системы

Показатели	Среда между излучателями-электродами			
	Воздух	Дистиллированная вода	Модельный раствор с солями CuSO_4 , NiSO_4 концентрацией 5 г/л	Золото-содержащая пульпа
k – коэффициент отражателя, %/дел	10	10	10	10
n – число делений	1,10	1,00	1,00	1,10
n' – поправочное число делений	1,11	1,01	1,01	1,11
p – коэффициент отражения	0,11	0,10	0,10	0,11
W – волновое сопротивление, Ом	62,36	61,11	61,11	62,36
R_n – сопротивление нагрузки, Ом	77,99	74,84	74,84	77,99
R_p – продольное сопротивление, Ом	15,63	13,73	13,73	15,63

По проделанным опытам можно сделать следующие выводы:

1. Электрические характеристики близки для всех пяти видов использованных излучателей-электродов.
2. В исследованных ЭС характер неоднородности активный, сопротивление нагрузки – порядка 74...78 Ом и продольное сопротивление – 13,73...15,63 Ом, волновое сопротивление – 61,11...62,36 Ом.
3. По рефлектограммам было определено, что характеристики ЭС в водной среде и в воздухе мало различаются между собой.
4. Коэффициент отражения составил 0,10...0,11, это означает, что к обрабатываемой среде подводится 89...90 % энергии от генератора.
5. Следует отметить, что согласование нагрузки с генератором провести невозможно, т. к. генератор имеет фиксированное выходное сопротивление 50 Ом, и его изменить нельзя. Приведенные выше параметры различных нагрузок демонстрируют, что они незначительно различаются между собой.

2.5 Измерение переходных характеристик электродной системы

Излучатели-электроды были использованы те же самые, как и при снятии энергетических характеристик.

Колбу из стекла или из стали наполняли водным раствором объемом 600 мл. В качестве водных растворов были взяты:

- дистиллированная вода;
- растворенные в дистиллированной воде соли CuSO_4 и NiSO_4 концентрацией 5 г/л;
- золотосодержащая пульпа.

Оценка переходных характеристик производилась по шкале ЭЛТ. На рисунке 2.18 показаны переходная характеристика и измеренные величины. Были измерены такие величины, как время нарастания переходной характеристики τ_n , время установления переходной характеристики τ_y , величина перепада h_y , величина выброса h_b , неравномерность вершины переходной характеристики h_c , неравномерность установившегося значения переходной характеристики h_n . Результаты измерений представлены в таблицах 2.5, 2.6.

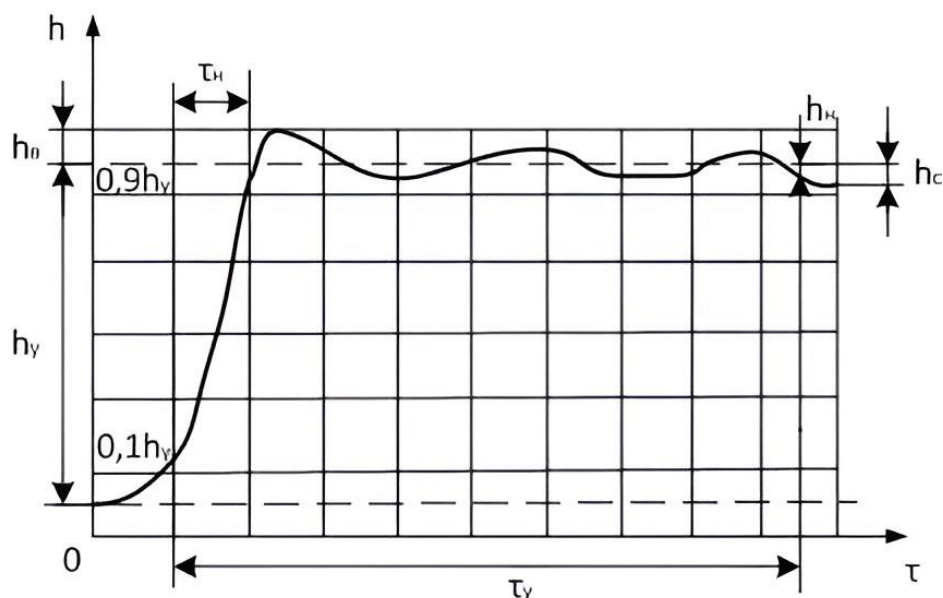


Рисунок 2.18 – Параметры переходных характеристик

Таблица 2.5 – Величины переходных характеристик для ЭС с изолированной ёмкостью

Величины переходных характеристик							
Воздух (установка без колбы)	Параметры перех. характеристик	Материал электрода					
		Графит ($d = 2,5$ мм)	Серебро	Медь	Стержень с никелевым покрытием	Графит ($d = 6$ мм)	Медная спираль
	$\tau_{\text{H}}, \text{нс}$	0,3	0,28	0,25	0,3	0,33	0,31
	$\tau_{\text{Y}}, \text{нс}$	24	19,6	22,5	22,5	26,4	23,87
	$h_{\text{Y}}, \text{мВ}$	14,00	15,20	15,20	14,00	14,40	14,40
	$h_{\text{B}}, \text{мВ}$	0,40	0,80	0,80	0,40	0,40	0,80
	$h_{\text{C}}, \text{мВ}$	2,40	2,00	2,40	2,80	3,20	2,00
	$h_{\text{H}}, \text{мВ}$	0,80	0,40	0,40	1,20	1,20	0,80
Воздух	$\tau_{\text{H}}, \text{нс}$	0,3	0,26	0,25	0,3	0,28	0,29
	$\tau_{\text{Y}}, \text{нс}$	24	20,8	18,75	23,4	22,4	22,62
	$h_{\text{Y}}, \text{мВ}$	14,00	14,80	14,00	14,00	14,00	13,60
	$h_{\text{B}}, \text{мВ}$	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
	$h_{\text{C}}, \text{мВ}$	3,20	2,40	2,40	3,20	2,40	2,00
	$h_{\text{H}}, \text{мВ}$	1,20	0,80	0,80	0,80	0,40	0,80
Дистил. вода	$\tau_{\text{H}}, \text{нс}$	0,25	0,26	0,25	0,28	0,28	0,3
	$\tau_{\text{Y}}, \text{нс}$	20	19,5	18,75	21,84	21,28	24
	$h_{\text{Y}}, \text{мВ}$	16,00	14,80	14,00	14,40	14,00	13,60
	$h_{\text{B}}, \text{мВ}$	0,80	0,80	0,40	0,40	0,80	0,40
	$h_{\text{C}}, \text{мВ}$	2,00	1,60	2,40	1,60	1,60	1,20
	$h_{\text{H}}, \text{мВ}$	0,40	0,80	0,80	0,80	0,40	0,40
Соль CuSO_4	$\tau_{\text{H}}, \text{нс}$	0,29	0,3	0,25	0,28	0,25	0,29
	$\tau_{\text{Y}}, \text{нс}$	22,62	23,4	19,5	21	19,5	23,2
	$h_{\text{Y}}, \text{мВ}$	14,00	14,00	14,40	14,40	14,80	14,00
	$h_{\text{B}}, \text{мВ}$	0,80	0,80	0,40	0,40	0,40	0,80
	$h_{\text{C}}, \text{мВ}$	2,00	1,60	1,60	1,60	1,20	1,20
	$h_{\text{H}}, \text{мВ}$	0,40	0,80	0,80	0,40	0,40	0,80
Соль NiSO_4	$\tau_{\text{H}}, \text{нс}$	0,3	0,2	0,25	0,25	0,28	0,3
	$\tau_{\text{Y}}, \text{нс}$	24	15	19	19	21,28	23,4
	$h_{\text{Y}}, \text{мВ}$	14,80	15,20	14,40	14,80	14,40	14,00
	$h_{\text{B}}, \text{мВ}$	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,80
	$h_{\text{C}}, \text{мВ}$	1,60	2,00	1,60	1,60	1,20	1,60
	$h_{\text{H}}, \text{мВ}$	0,40	0,40	0,80	0,40	0,40	0,40

Таблица 2.6 – Величины переходных характеристик для ЭС с проводящей ёмкостью

Величины переходных характеристик							
Воздух (установка без колбы)	Параметры перех. характеристик	Материал электрода					
		Графит ($d = 2,5$ мм)	Серебро	Медь	Стержень с никелевым покрытием	Графит ($d = 6$ мм)	Медная спираль
	$\tau_{\text{H}}, \text{нс}$	0,29	0,26	0,26	0,3	0,28	0,29
	$\tau_{\text{Y}}, \text{нс}$	22,91	20,8	19,5	23,4	22,4	23,2
	$h_{\text{Y}}, \text{мВ}$	13,60	14,40	14,00	14,40	14,00	13,60
	$h_{\text{B}}, \text{мВ}$	0,40	0,40	0,80	0,40	0,40	0,80
	$h_{\text{C}}, \text{мВ}$	3,20	2,40	2,40	3,20	2,40	2,40
	$h_{\text{H}}, \text{мВ}$	0,40	0,80	0,80	0,40	0,40	0,80

Продолжение таблицы 2.6

Величины переходных характеристик							
	Параметры перех. характе- ристик	Материал электрода					
		Графит ($d = 2,5$ мм)	Серебро	Медь	Стержень с никелевым покрытием	Графит ($d = 6$ мм)	Медная спираль
Воздух	$\tau_n, \text{нс}$	0,28	0,3	0,3	0,3	0,28	0,29
	$\tau_y, \text{нс}$	21,84	24	23,7	24	22,4	23,2
	$h_y, \text{мВ}$	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
	$h_b, \text{мВ}$	0,80	0,40	0,40	0,80	0,40	0,40
	$h_c, \text{мВ}$	2,40	3,20	2,00	1,60	1,20	1,60
	$h_n, \text{мВ}$	0,40	0,80	0,80	0,40	0,40	0,80
	$h_{n_1}, \text{мВ}$	0,40	0,80	0,80	0,40	0,40	0,80
Дистил. вода	$\tau_n, \text{нс}$	0,8	0,26	0,25	0,28	0,28	0,3
	$\tau_y, \text{нс}$	20	19,5	18,75	21,84	21,28	24
	$h_y, \text{мВ}$	16,00	14,80	14,00	14,40	14,00	13,60
	$h_b, \text{мВ}$	0,80	0,80	0,40	0,40	0,80	0,40
	$h_c, \text{мВ}$	2,00	1,60	2,40	1,60	1,60	1,20
	$h_n, \text{мВ}$	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,40
	$h_{n_1}, \text{мВ}$	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,40
Золотосодер- жащая пульпа	$\tau_n, \text{нс}$	0,3	0,28	0,3	0,3	0,28	0,29
	$\tau_y, \text{нс}$	24	22,4	24	24	22,4	22,91
	$h_y, \text{мВ}$	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
	$h_b, \text{мВ}$	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,80
	$h_c, \text{мВ}$	3,20	2,40	2,40	0,80	1,20	2,00
	$h_n, \text{мВ}$	1,20	0,80	0,80	0,40	0,40	0,40
	$h_{n_1}, \text{мВ}$	1,20	0,80	0,80	0,40	0,40	0,40

На основе проделанных опытов был сделан вывод:

1. Величины переходных характеристик отраженного сигнала в воздушной среде соразмерны с водной средой.
2. Переходные характеристики отраженного сигнала не зависят ни от материала ЭС, ни от вещества между излучателями-электродами, а зависят только от параметров генератора.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ НЭМИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Для проведения испытаний по воздействию НЭМИ на водные растворы была собрана лабораторная установка (рисунок 3.1) с ЭС «излучатель-электрод в стеклянной колбе», которая описана в главе 2.

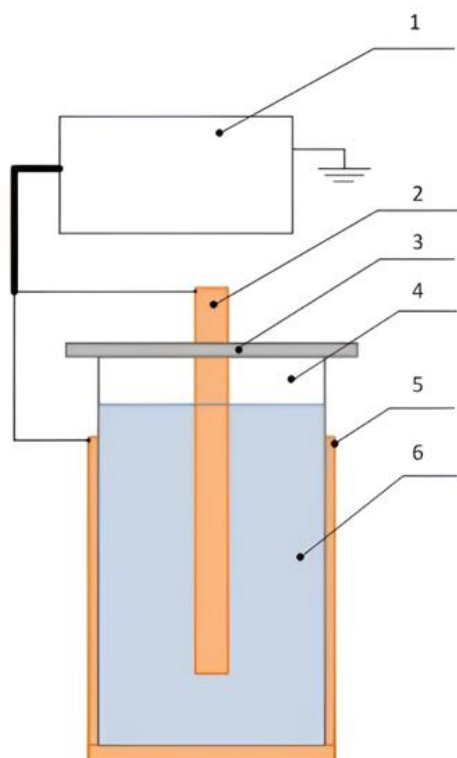


Рисунок 3.1 – Лабораторная установка НЭМИ: 1 – генератор НЭМИ; 2 – пусковой излучатель-электрод; 3 – фиксатор; 4 – колба; 5 – экран из медной фольги – заземленный излучатель-электрод; 6 – обрабатываемый раствор

Для исследований по воздействию НЭМИ на артезианскую, сточные воды и модельные растворы были использованы излучатели-электроды:

- из посеребренного стержня диаметром 18 мм, длиной 120 мм;
- меди диаметром 5 мм, длиной 120 мм;
- графита размером 15×15×200 мм.

3.1 Обработка НЭМИ дистиллированной воды

Первые результаты обработки водных растворов НЭМИ представлены в работах [109–111]. Ключевые исследования, освещающие влияние наноимпульсов на бидистиллят, изложены в работе [109]. В ходе эксперимента варьировалась продолжительность обработки, а для измерения электрических характеристик применялся мост переменного тока Р5010, обеспечивающий погрешность измерений до 0,5 %. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Показатели рН и ϵ в обработанном и исходном бидистиллятах

Вода	Время обработки	рН, ед.	Диэлектрическая проницаемость ϵ , ед.
Бидистиллят	Исх.	6,7	55,65
	200 с	6,7	57,0
	400 с	6,75	57,26
	800 с	6,8	57,69
Бидистиллят	Исх.	6,7	55,71
	100 с	6,7	56,80
	200 с	6,7	57,15
	20 мин	6,8...6,85	60,16

Анализ данных показывает, что повышение уровня рН бидистиллята происходит через 400 с воздействия НЭМИ. По истечении 20 мин отмечается рост диэлектрической проницаемости в диапазоне 7,8...8,1 %, а рН увеличивается на 0,1–0,14 единицы. В ходе исследования установлено, что увеличение длительности обработки не изменяет значения диэлектрической проницаемости. Таким образом, оптимальным временем для обработки НЭМИ считается 20 мин, которые будут использоваться как предел в будущих экспериментах.

В этой же работе [109] представлены опыты по измерению удельного сопротивления раствора. Экспериментальные данные представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Влияние обработки НЭМИ на характеристики воды

Вода	Время обработки, мин	pH, ед.	R_c , кОм	τ , мс	ρ , Ом·м	Время после обработки, ч
Бидистиллят	Исх.	6,6	7,766	1,65	1242,56	
	20	6,7...6,75	6,371	1,45	1019,36	
	20	6,7...6,75	6,23	1,39	997,36	2
	20	6,75	6,404	1,39	1024,64	24
	20	6,6	6,124	1,32	1219,84	96
	20	6,8...6,85	6,429	1,15	740,64	В темноте 96
	20	6,8	4,572	1,09	731,52	После 96 ч и на свету 2 ч
Бидистиллят	20	6,7	4,864	1,06	778,24	После 96 ч и на свету 24 ч
	20	6,6...6,65	4,921	1,15	787,36	В темноте 120

По результатам экспериментальных данных можно сделать выводы:

- при обработке бидистиллята НЭМИ за 20 мин наблюдается снижение сопротивления на 20...22 %;
- в течение 24 ч этот показатель сохраняется.

Эксперимент, описанный в исследовании [109], направлен на сравнительное изучение эффектов, вызванных использованием НЭМИ и электролиза. Полученные данные эксперимента представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Сравнение электролиза и обработки НЭМИ дистиллированной воды

Параметр	Исходная	После обработки НЭМИ	После электролиза 1,2 В
pH	5,61	5,85	5,75
ϵ	53,9	63	55,6
ρ , Ом·м	1982	769	1552

По данным таблицы видим, что использование метода обработки дистиллированной воды НЭМИ приводит:

- к увеличению pH и ϵ ;
- уменьшению удельного сопротивления более чем в 2 раза.

Научные данные свидетельствуют о том, что применение НЭМИ способствует образованию новых носителей зарядов воды, что приводит к уменьшению ее удельного сопротивления.

3.2 Обработка НЭМИ питьевой воды

В случаях, когда в составе питьевой воды фиксируется повышенная концентрация веществ, согласно требованиям СанПиН 2.1.4.10, возникает необходимость применения дополнительных методов для доведения воды до необходимого стандарта. Для определения целесообразности применения технологий очистки таких вод НЭМИ были организованы и проведены соответствующие эксперименты.

Опыт 1.

Обработка НЭМИ артезианской воды производилась в ЭС из стеклянной колбы. Объём воды – 600 мл. Использовался генератор с параметрами: амплитуда и частота импульсов – 15 кВ и 1 кГц соответственно. Стержень с серебряным слоем использовался в качестве пускового излучателя-электрода. Погружение составило 30 мм, а продолжительность эксперимента достигла 15 мин. При оценке результатов был проведен спектральный анализ с индуктивно связанной плазмой. Данные полученных результатов представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Содержание элементов в пробах

Образцы	Наименование показателей, мг/л		
	Cu	Fe	Mn
Исходная	0,012	0,091	0,036
Обработанная	0,011	0,047	0,032

Согласно данным таблицы, отмечается снижение содержания железа на 41 %. Изменения в содержания ионов меди и марганца находятся в пределах погрешности. Подобные результаты были получены в исследовании, посвященном контрольным растворам, как указано в источнике [109].

Для изучения воздействия НЭМИ на ионы Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+} , Cr^{6+} использовались растворы соединений FeSO_4 , CuSO_4 , $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Применялся генератор НЭМИ типа GNP. Результаты представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Содержание ионов металлов в пробах

Образцы	Наименование показателей, мг/л				
	Fe	Cu	Zn	Cr ³⁺	Cr ⁵⁺
Исходная	1,2	0,8	46,8	3,2	5,65
50 с	0,6	0,32	30,0	3,15	4,75
100 с	0,85	0,19	34,0	1,75	5,4
200 с	0,8	0,21	32,0	2,25	5,25
400 с	0,85	0,16	32,0	1,5	6,0

Наблюдается снижение концентрации ионов меди, железа и цинка.

В исследовании [109] проведено сопоставление очистки воды с помощью НЭМИ и фильтром «Изумруд». Использовался генератор типа GNP. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6. – Содержание ионов Fe в растворе, мг/л

Исходная	После фильтра «Изумруд»	После обработки НЭМИ
0,084	0,0594	0,042

Согласно проведённым исследованиям, метод обработки НЭМИ показывает большую эффективность в удалении железа из воды по сравнению с фильтром «Изумруд».

Опыт 2.

В рамках исследований, проведённых на Карамовском месторождении ЯНАО, осуществлялась очистка подземных вод в условиях, аналогичных первому эксперименту. Изначальное значение pH жидкости составляло 6,5. Для процедуры использовался медный излучатель-электрод в форме стержня с диаметром 6 мм, погружённый на глубину 30 мм. Эксперимент длился 15 мин. В результате концентрация железа в воде уменьшилась на 10 %, при этом pH остался на уровне 6,5.

Опыт 3.

Обработка воды проводилась в условиях опыта 2. Значение pH до обработки – 2,2. После процедуры наблюдалось снижение концентрации металла на 30 %, pH остался неизменным, сохранив значение 2,2.

Опыт 4.

В данном исследовании изучалась вода, взятая из источника 78-64а, расположенного в поселке Смолино Челябинской области. Для эксперимента использовался резервуар из пищевой нержавеющей стали диаметром 240 мм и высотой 130 мм, в который было залито 1,8 л жидкости. В центральной части ёмкости был установлен графитовый излучатель-электрод размером 15×15×200 мм, при этом расстояние до дна резервуара от нижнего края электрода составило 10 мм. Генератор, использованный в эксперименте, имел следующие параметры: длительность импульса – 1 нс, амплитуда напряжения – 15 кВ, частота – 1 кГц. Эксперимент длился 10 мин, после чего образцы передавались на анализ. Результаты представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Химический состав воды, мг/л

Элемент	Проба 78-64а Исходная	Проба 78-64а Обработанная I
Алюминий	0,0346	0,0163
Кобальт	Менее 0,1	Менее 0,1
Хром	0,0084	Менее 0,1
Медь	0,2796	0,0044
Железо	0,0273	0,0055
Калий	1,5260	2,258
Магний	35,25	38,76
Натрий	41*	29,04
Никель	0,0046	0,0038
Фосфор	0,0345	0,0321
Свинец	0,0122	0,0092
Ванадий	0,0646	0,0216
Кремний	9,56	9,53

Из данных таблицы следует, что при обработке НЭМИ фиксируется снижение концентрации алюминия, железа и меди.

В работе [111] представлены результаты экспериментов, касающихся воздействия НЭМИ на различные бактерии. Время обработки НЭМИ – 10 и 20 мин. Результаты представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты анализов

Бактериальная культура	Разведение	Всхожесть до обработки	Всхожесть после обработки	
			10 мин	20 мин
E.coli	10^7	Сплошной рост	>> 100 кол	До 100
	10^8	Масс. рост		До 100
Staph.aureus	10^7	Масс. рост	Масс. рост	Масс. рост
	10^8	Масс. рост	Масс. рост	Масс. рост
Shigella	10^7	Масс. рост		До 100 кол
	10^8	Масс. рост		<< 100 кол
Salmonellas	10^7	Масс. рост	Масс. рост	Масс. рост
	10^8	Масс. рост	Масс. рост	Масс. рост

Анализ данных указывает на снижение жизнеспособности бактерий кишечной палочки и бактерий, вызывающих дизентерию, при воздействии НЭМИ. В то же время устойчивость штаммов сальмонеллеза и стафилококка остается на прежнем уровне без изменений. По положительным результатам представленных опытов можно сделать вывод: НЭМИ можно использовать в очистке питьевой воды от железа, алюминия, меди и бактерий.

3.3 Обработка НЭМИ сточных вод

Одна из актуальных задач на сегодняшний день – это очистка сточных вод. В исследовании [111] анализируется процесс очистки сточных вод НЭМИ, поступающих из водоочистных установок г. Челябинска после завершения биологической стадии очистки. Использовался генератор типа GNP. В процессе обработки осуществлялась аэрация воды с помощью устройства с эффективностью 90 л/ч, а также перемешивание с помощью магнитной мешалки. Подробные выводы исследования представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты анализов

Контролируемые показатели	Исходная вода, мг/л	Обработанная вода, мг/л
PO ₄	4,8	4,2
HN ₄	Не обн.	Не обн.
NO ₃	15,6	14,6
NO ₂	0,03	0,306
Zn	0,2	0,15
Cu	0,01	0,01
S ²⁻	Не обн.	Не обн.
SO ₄	98,1	98,1
Cr ⁺³	0,003	0,003
Al	0,04	0,02
Fe	0,19	0,02
Ni	Не обн.	Не обн.
Взв.	10,0	2,0
БПК ₅	5,5	3,7
СПАВ	Не обн.	Не обн.

Отмечается снижение уровней элементов, таких как алюминий, железо, цинк.

В проведенных экспериментах воздействию НЭМИ подвергались пробы сточных вод на выходе и входе очистных сооружений «Участок нейтрализации» Учалинского горно-обогатительного комбината (УГОК). УГОК – предприятие по добыче медно-колчеданных руд и производству медного, цинкового концентрата, серного флотационного колчедана, поэтому в промышленных стоках этого предприятия наблюдается высокое содержание добываемых элементов.

В экспериментах использовался генератор ФИД с параметрами: длительность и амплитуда импульса – 15 кВ и 1 нс соответственно, частота повторения импульсов – 1 кГц. Время обработки – 15 мин.

Опыт 1.

Обработка воды на выходе очистных сооружений производилась в стеклянном стакане в экране из медной фольги. Объем воды – 600 мл. Пусковой излучатель-электрод выполнен из двух стержней с серебряным покрытием, расстояние между которыми – 45 мм. Глубина погружения составляет 30 мм.

Опыт 2.

При тех же условиях производили обработку этой же воды, предварительно увеличив рН до 9,5 добавлением NaOH. После обработки замечено помутнение воды. Результаты анализов представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Содержание элементов в растворе, мг/л

Наименование показателей	Исх.	Обработка при	
		рН = 8,03	рН = 9,5
рН	8,03	8,31	11,62
Медь (Cu, суммарно), мг/л	0,077	0,029	0,020
Железо (Fe, суммарно), мг/л	0,050	0,035	0,039
Цинк (Zn, суммарно), мг/л	0,030	0,253	0,086
Марганец (Mn, суммарно), мг/л	0,142	0,190	0,048
Сульфаты (SO ₄), мг/л	2875,0	2883,3	2477,8

Из данных таблицы следует, что значительно уменьшилось содержание марганца, цинка, меди, заметно снизилось содержания железа при добавлении NaOH. Увеличение содержания цинка, меди и сульфатов обработанной воды при рН = 8,03 – в пределах погрешности.

Опыт 3.

Обработка производственной воды на входе очистных сооружений осуществлялась в стеклянном стакане в экране из медной фольги. Объем воды – 600 мл. Пусковой излучатель-электрод выполнен из двух стержней с серебряным покрытием, расстояние между которыми – 45 мм. Глубина погружения составляет 30 мм.

Опыт 4.

При тех же условиях производилась обработка этой же воды с предварительным увеличением рН до 9,5 добавлением NaOH. После обработки наблюдалось заметное помутнение воды. Результаты анализов представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Содержание элементов в воде, мг/л

Наименование показателей	Исх.	Обработка при	
		pH = 5,59	pH = 9,5
pH	5,59	5,58	11,42
Медь (Cu, суммарно), мг/л	5,989	5,670	1,353
Железо (Fe, суммарно), мг/л	0,321	0,236	0,087
Цинк (Zn, суммарно), мг/л	139,33	146,03	20,287
Марганец (Mn, суммарно), мг/л	19,10	19,200	2,379
Сульфаты (SO ₄), мг/л	2458,4	2550,0	2447,3

Данные таблицы показывают, что после обработки воды НЭМИ содержание металлов уменьшается более чем в 5 раз. По проведенным опытам можно сделать вывод, что технологию НЭМИ можно использовать в очистке сточных вод.

3.4 Обработка НЭМИ водных растворов с высокой концентрацией металлов

Был проведен ряд опытов по обработке НЭМИ модельных растворов с высокой концентрацией ионов металлов порядка 5 г/л.

Для исследования воздействия НЭМИ на процесс образования кристаллов меди и конгломератов железа использовался генератор с параметрами импульса: длительность и амплитуда 1 нс с фронтом 0,1 нс и 15 кВ соответственно и частота повторения – 1 кГц.

Модельный раствор был приготовлен из дистиллированной воды и солей CuSO₄, NiSO₄ концентрацией 5 г/л. Объем пробы раствора – 600 мл. Обработка производилась в стеклянной емкости диаметром 80 мм, высотой 150 мм в экране из медной фольги. Температура помещения – 24 °С. Изначально раствор нагрели до 90 °С, чтобы не довести раствор до кипения. Время обработки – 10 мин.

Морфологические особенности образовавшихся соединений, электрода до и после обработки, выпавшего осадка изучали на электронном микроскопе *JEOL JSM 648 CLV* с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа. На рисунке 3.2 представлена экспериментальная установка для обработки модельных растворов с нагреванием.

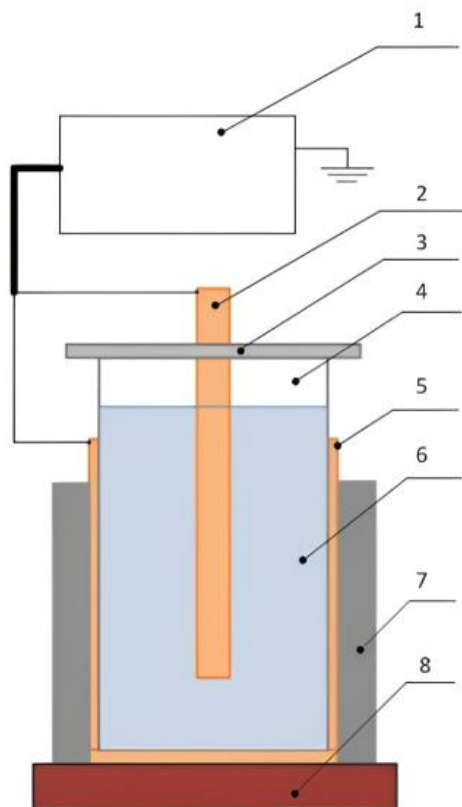


Рисунок 3.2 – Экспериментальная установка: 1 – генератор НЭМИ; 2 – пусковой излучатель-электрод; 3 – фиксатор; 4 – колба; 5 – экран из медной фольги – заземленный излучатель-электрод; 6 – обрабатываемый раствор, 7 – теплоизолятор; 8 – электрическая печь

Опыт 1.

Пусковой излучатель-электрод из графита: диаметр – 2,5 мм, длина – 106 мм, глубина погружения – 86 мм. После обработки выпал темно-зеленый и светло-зеленый осадок, также на дне образовался бело-зеленый налет. В результате для проведения анализа осадок был разделен на две пробы:

- темно-зеленый;
- светло-зеленый.

На микроскопический анализ были отправлены две пробы осадка. В таблице 3.12 представлены усредненные значения соединений элементов состава темно-зеленого осадка.

Таблица 3.12 – Усредненные значения соединений элементов состава темно-зеленого осадка, в весовых %

O	S	Fe	Ni	Cu	Итого
26,05	5,21	5,94	1,33	44,43	100,00

На рисунке 3.3 приведены изображения кристаллов осадка.

По результатам спектрограмм было выяснено, что темно-зеленый осадок состоит в основном из кристаллов (неправильной формы) меди с наростами железа и образований Ni, O, S.

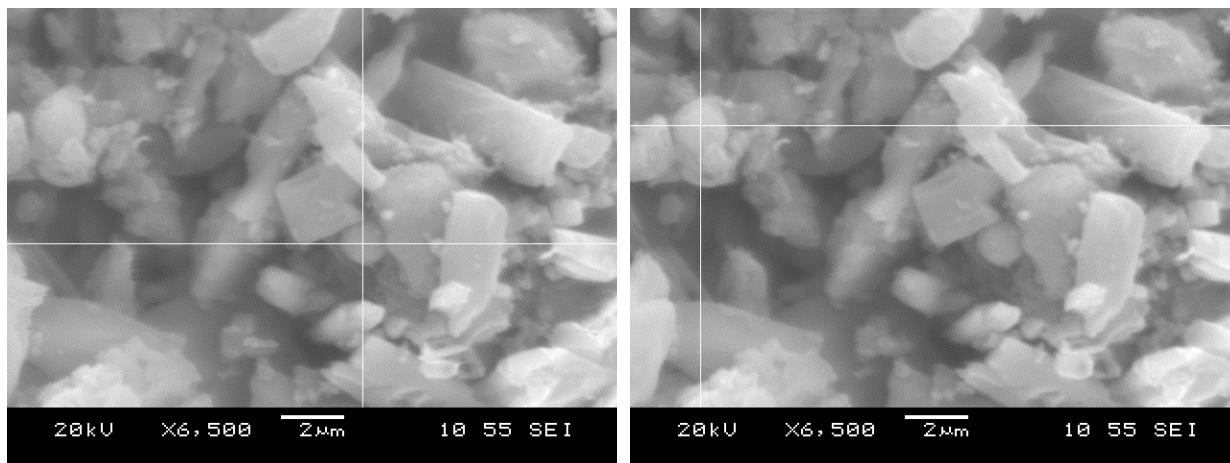


Рисунок 3.3 – Электронные микрофотографии темно-зеленого осадка

В таблице 3.13 приведены усредненные значения соединений элементов состава светло-зеленого осадка.

Таблица 3.13 – Усредненные значения соединений элементов состава светло-зеленого осадка, в весовых %

O	S	Fe	Ni	Cu	Итого
36,19	8,12	1,01	0,88	53,80	100,00

На рисунке 3.4 приведены изображения кристаллов осадка.

По результатам спектрограмм было выяснено:

– выпавший светло-зеленый осадок состоит в основном из образований Cu, O, S (рисунок 3.4, а);

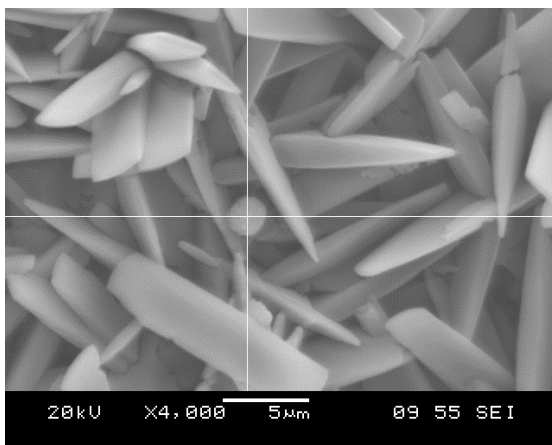
- выявлены наросты конгломератов железа на кристаллы меди (рисунок 3.4, б, в);
- обнаружены очень малые соединения конгломератов железа (рисунок 3.4, г).

Опыт 2.

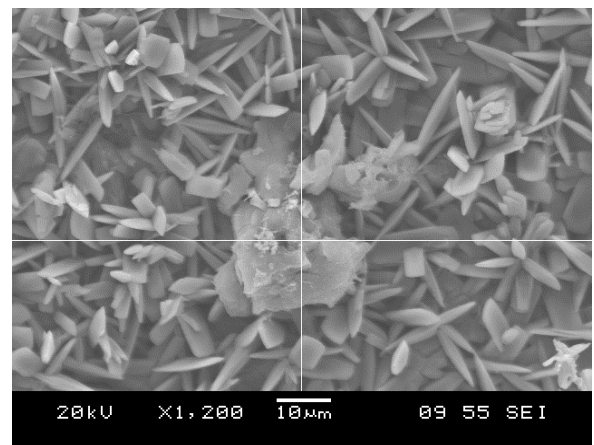
Пусковой излучатель-электрод из стального стержня с никелевым покрытием: диаметр – 1,5 мм, длина – 115 мм, глубина погружения – 77 мм. На излучателе-электроде после обработки были заметны шероховатости. Обработанный раствор стал мутным, выпал светло-коричневый осадок.

На микроскопический анализ были отправлены образцы:

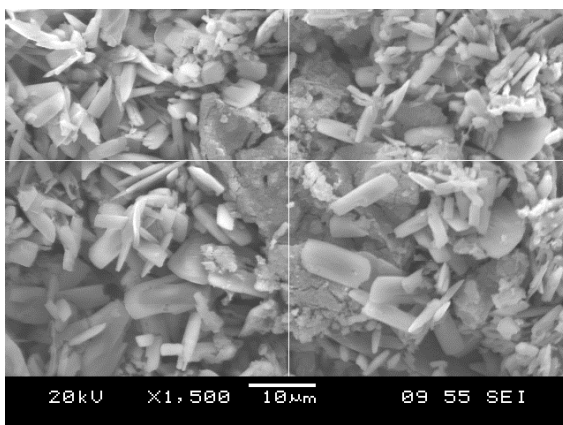
- излучатель-электрод после выдержки в растворе без обработки 10 мин;
- излучатель-электрод после обработки.



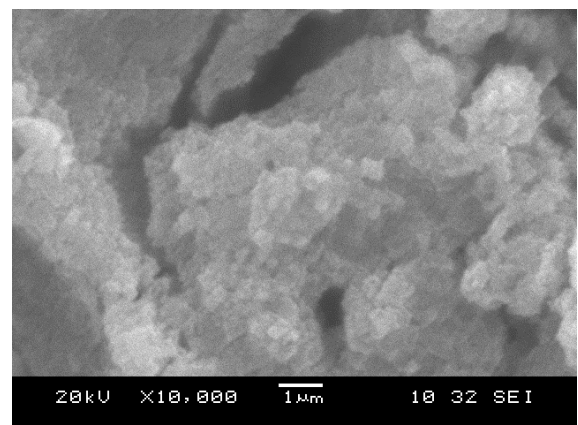
а



б



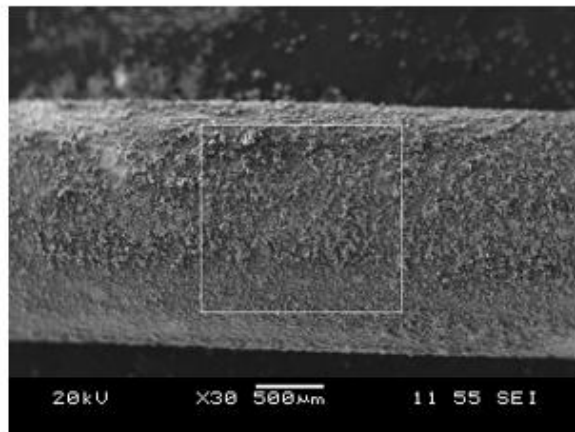
в



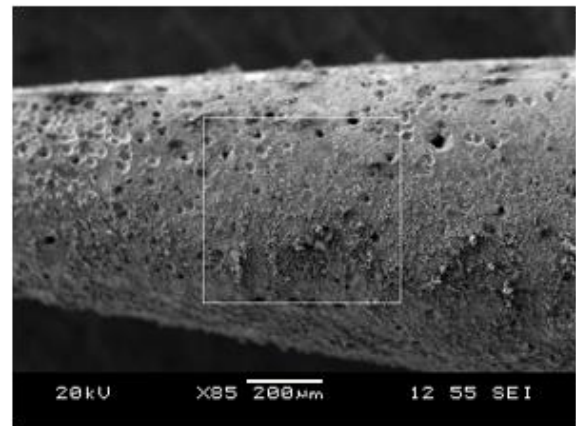
г

Рисунок 3.4 – Электронные микрофотографии светло-зеленого осадка

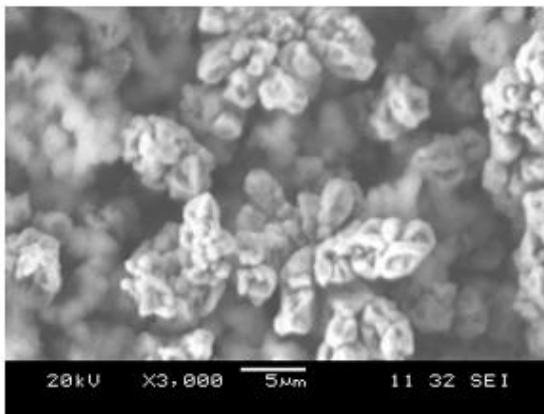
На рисунке 3.5 представлено изображение поверхности излучателя-электрода после выдержки в растворе без обработки.



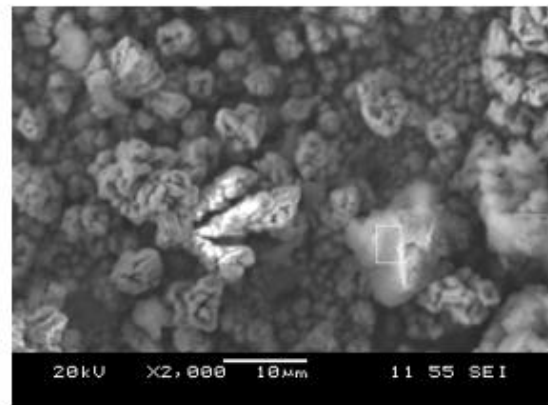
Общий вид



Острый конец



Кристалл меди

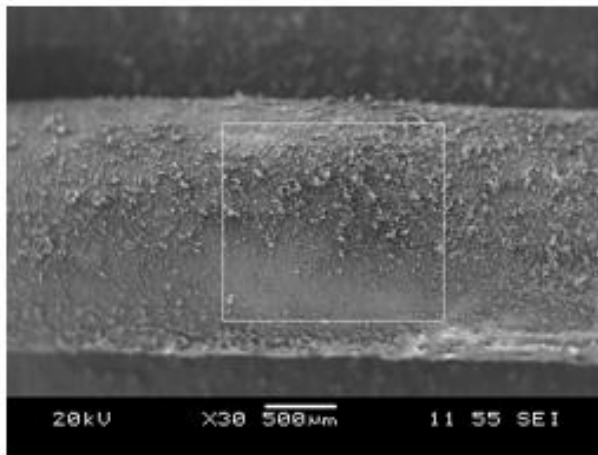


Кристаллы меди

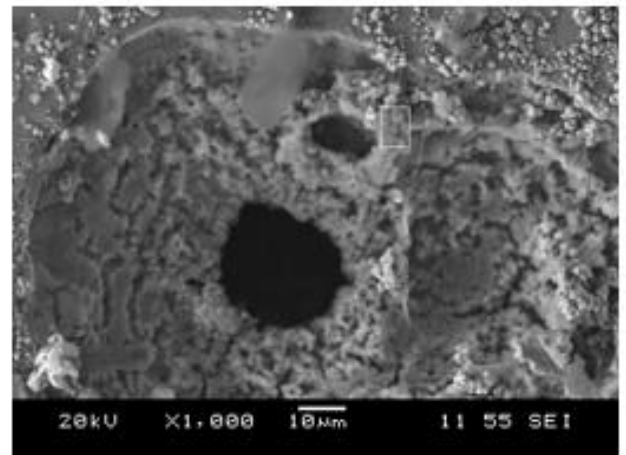
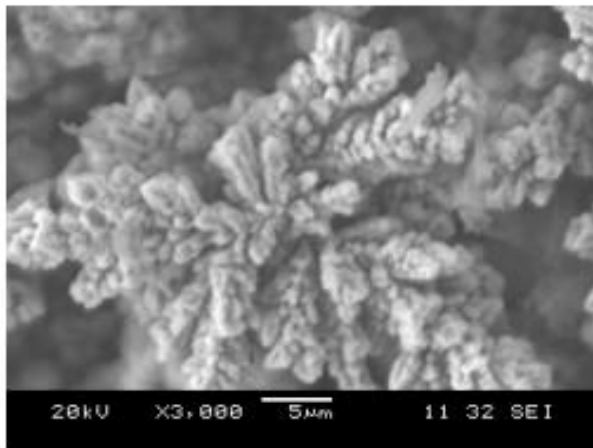
Рисунок 3.5 – Электронные микрофотографии поверхности излучателя-электрода

На рисунке 3.6 приведены электронные микрофотографии поверхности излучателя-электрода после обработки.

Вывод: при погружении в раствор излучателя-электрода из стали с никелевым покрытием, содержащий соли NiSO_4 и CuSO_4 концентрацией 5 г/л, происходит процесс коррозии. Замечено, что при обработке раствора НЭМИ процесс коррозии излучателя-электрода интенсивнее, причем на острие иглы процесс коррозии происходит интенсивнее, чем по всей длине, о чем свидетельствует спектрограмма на этом участке. На излучателе-электроде



Общий вид

Наглядный процесс коррозии на
остром конце

Кристалл меди

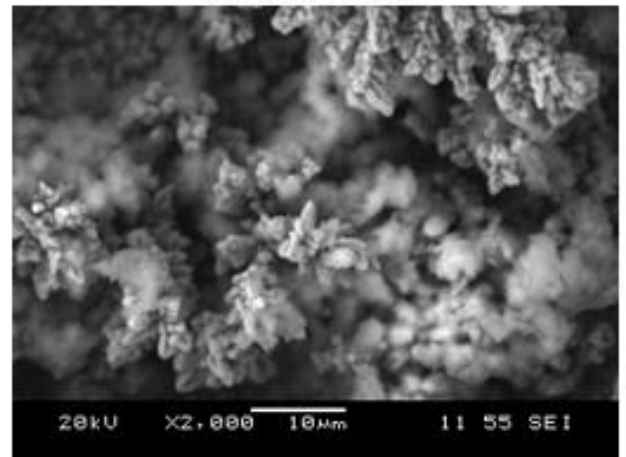
Соединения железа рядом с
кристаллами меди

Рисунок 3.6 – Электронные микрофотографии поверхности излучателя-электрода

образуются кристаллы меди: без обработки – неправильной формы, после обработки – правильной формы.

Опыт 3.

При условиях опыта 2 производилась обработка раствора. Пусковой излучатель-электрод из стального стержня с никелевым покрытием: диаметр – 1,5 мм, длина – 115 мм, глубина погружения – 45 мм. После обработки образовался коллоидный раствор. На микроскопический анализ были отправлены излучатель-электрод до и после обработки, осадок. В таблице 3.14 представлен состав поверхности излучателя-электрода до обработки.

Таблица 3.14 – Состав излучателя-электрода без обработки, в весовых %

Химический элемент	Fe	Ni	Итого
Среднее значение содержания	5,99	94,01	100,00

На рисунке 3.7 представлено изображение поверхности излучателя-электрода до обработки.

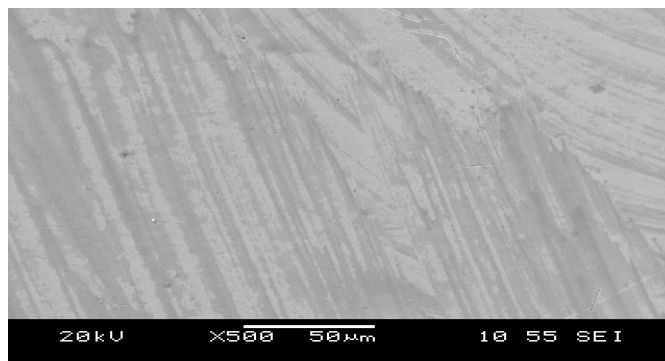


Рисунок 3.7 – Электронная микрофотография поверхности излучателя-электрода до обработки

В таблице 3.15 представлен состав поверхности излучателя-электрода после обработки.

Таблица 3.15 – Состав излучателя-электрода после обработки, в весовых %

Химический элемент	O	S	Fe	Cu	Итого
Среднее значение содержания	15,67	1,49	9,16	73,69	100,00

На рисунке 3.8 показано изображение поверхности излучателя-электрода после обработки.

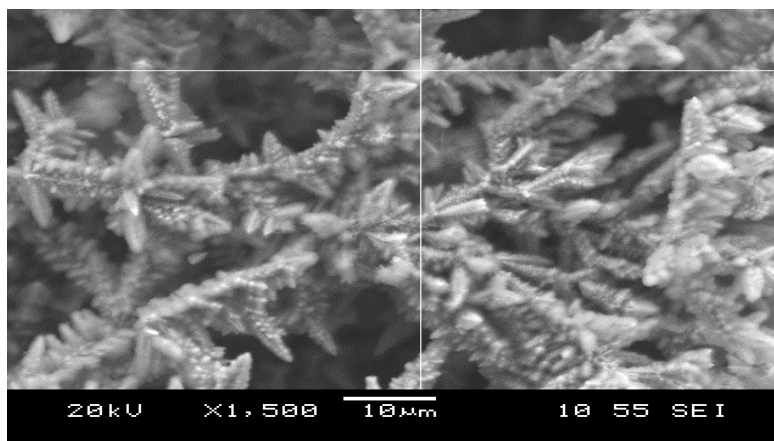


Рисунок 3.8 – Электронная микрофотография поверхности излучателя-электрода после обработки – кристаллы меди правильной формы

В таблице 3.16 представлен состав и на рисунке 3.9 дано изображение выпавшего в раствор осадка.

Таблица 3.16 – Состав осадка, в весовых %

Химический элемент	O	S	Fe	Ni	Cu	Итого
Среднее значение содержания элементов	41,68	5,48	41,98	2,96	7,89	100,00

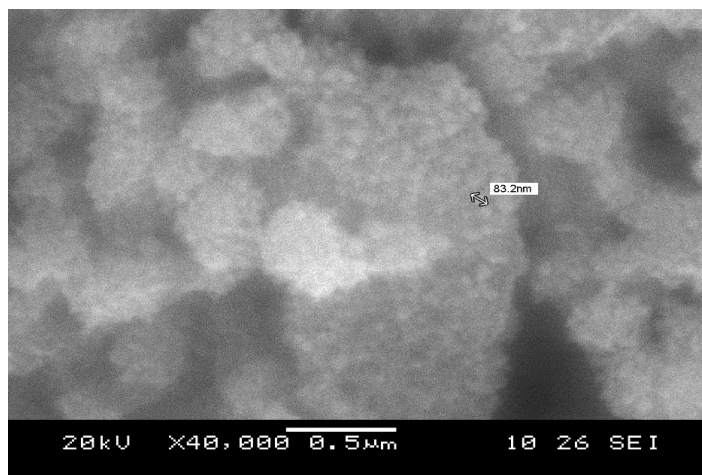


Рисунок 3.9 – Электронная микрофотография выпавшего осадка из конгломератов железа размером 83,2 нм

Для того чтобы узнать морфологию частиц и выяснить, какие кристаллы вырастают через 24 ч, на излучателе-электроде без обработки были проведены дополнительные опыты при тех же условиях. Анализ проб был сделан на электронном микроскопе *JEOL JSM-700IF Field Emission Scanning Electron microscope*. По проведенным опытам сделали следующие выводы:

1. В осадке без обработки обнаружены кристаллы меди двух видов:
 - чистая медь (рисунок 3.10, а, таблица 3.17);
 - дендриты меди (рисунок 3.10, б).

Наноразмерных конгломератов железа не найдено.

2. В осадке после обработки обнаружен рентгеноаморфный оксигидроксид железа FeOОН размером 30...50 нм (рисунок 3.10, в, таблица 3.17). Отсюда следует вывод о влиянии воздействия НЭМИ на образование наноразмерных конгломератов железа.

3. На пробе «Электрод без обработки» замечены наросты кристаллов меди (рисунок 3.10, *з*).

4. На пробе «Электрод после обработки» наблюдаются «скелетные кристаллы» меди правильной формы (рисунок 3.10, *д, е*, таблица 3.17). В результате можем предположить влияние воздействия НЭМИ на пространственное построение соединений химических элементов, в частности на кристаллы меди.

Таблица 3.17 – Массовое содержание элементов в пробах, %

Химический элемент	O	Al	S	Fe	Ni	Cu	Итого
Проба «Осадок без обработки»	5,48	0,28	0,02	0,12	0,00	94,10	100,00
Проба «Осадок после обработки»	51,91	1,21	6,18	28,33	3,60	8,24	100,00
Проба «Электрод до обработки»	12,29	0,14	2,88	45,97	9,92	28,73	100,00
Проба «Электрод после обработки»	18,17	0,10	2,47	8,86	4,05	66,36	100,00

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. При погружении излучателя-электрода – стального стержня с никелевым покрытием – в горячий модельный раствор, содержащий соли NiSO_4 и CuSO_4 концентрацией 5 г/л, происходит процесс коррозии, замечено, что на кончике стержня процесс интенсивный. На излучателе-электроде образуются кристаллы меди, а в осадок выпадают конгломераты железа с размерами 300...800 нм и соединения меди.

2. Образовавшийся налет на излучателе-электроде после обработки в основном состоит из кристаллов соединений меди правильной формы (так называемые скелетные кристаллы). Можем сделать вывод, что воздействие НЭМИ влияет на пространственное построение соединения химических элементов.

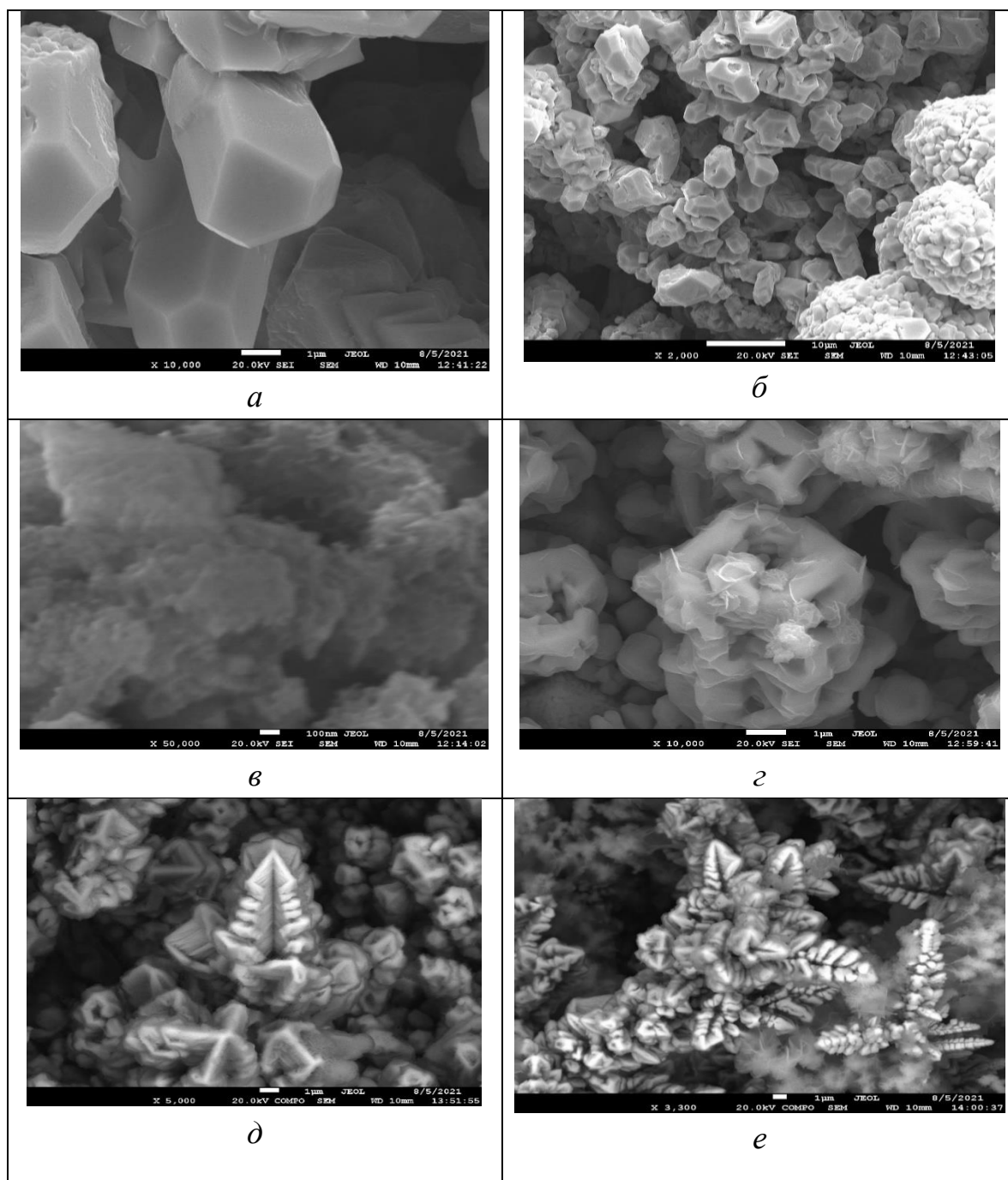


Рисунок 3.10 – Электронные микрофотографии осадка и кристаллов на электроде

3. О влиянии НЭМИ на образование новых соединений очень малых размеров свидетельствует тот факт, что при обработке модельного раствора, содержащего соли NiSO_4 и CuSO_4 концентрацией 5 г/л, излучателем-электродом из стали с никелевым покрытием наблюдается выпадение осадка из конгломератов железа порядка 30...90 нм, который меньше в 10 раз, чем результат без обработки.

3.5. Обработка НЭМИ модельных растворов с разными концентрациями металлов

Для исследования воздействия НЭМИ на ионы металлов были проведены опыты модельных растворов с содержанием железа, меди и цинка. Для этого приготовили раствор из дистиллированной воды и солей металлов FeSO_4 , CuSO_4 концентрацией 0,1, 1, 20 мг/л. Использовался генератор импульсов с параметрами: амплитуда напряжения – 15 кВ; частота импульсов – 1 кГц; длительность импульса – 1 нс. Электродная система состоит из графитового стержня диаметром 6 мм, глубина погружения стержня – 70 мм; экрана из алюминиевой фольги, в котором находится стеклянный стакан. Время обработки – 10 мин. При концентрации 100 мг/л опыты повторялись при тех же условиях для проверки повторяемости эксперимента. Результаты опытов приведены в таблицах 3.18, 3.19.

Таблица 3.18 – Содержание железа в пробе

Проба	Fe, мг/л
Дист. вода	0,0137
«Исходная Fe 0,1 мг/л»	0,1093
«Обработанная 1 Fe 0,1 мг/л»	0,0742
«Обработанная 2 Fe 0,1 мг/л»	0,1012
«Обработанная 3 Fe 0,1 мг/л»	0,1089
«Исходная Fe 1 мг/л»	1,1574
«Обработанная Fe 1 мг/л»	1,2304
«Исходная Fe 20 мг/л»	19,4295
«Обработанная 1 Fe 20 мг/л»	19,1736
«Обработанная 2 Fe 20 мг/л»	19,6799
«Обработанная 3 Fe 20 мг/л»	19,5748
«Обработанная 4 Fe 20 мг/л»	17,8246
«Обработанная 5 Fe 20 мг/л»	17,7799

Таблица 3.19 – Содержание меди в пробе

Проба	Cu, мг/л
Дист. вода	0,0054
«Исходная Cu 0,1 мг/л»	0,1682
«Обработанная Cu 0,1 мг/л»	0,1649
«Исходная Cu 1 мг/л»	1,7192
«Обработанная Cu 1 мг/л»	1,7297
«Исходная Cu 20 мг/л»	18,2771
«Обработанная 1 Cu 20 мг/л»	18,4778
«Обработанная 2 Cu 20 мг/л»	18,6835
«Обработанная 3 Cu 20 мг/л»	18,7989
«Обработанная 4 Cu 20 мг/л»	18,3574
«Обработанная 5 Cu 20 мг/л»	18,3423

По данным таблиц видно, что при обработке НЭМИ модельных растворов с содержанием меди, железа в разных концентрациях не происходит заметного изменения содержания тех или иных элементов.

Во второй серии опытов модельные растворы были получены из дистиллированной воды и государственного стандартного образца (ГСО) $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ с концентрациями 1, 10, 100 мг/л. Электродная система и генератор импульсов имели такие же параметры, как и в первой серии опытов. Время обработки – 5 мин. При концентрации 100 мг/л опыты повторялись при тех же условиях для проверки повторяемости эксперимента. Результаты опытов приведены в таблицах 3.20, 3.21, 3.22.

Таблица 3.20 – Содержание железа в пробе

Проба	Fe, мг/л
Дист. вода	11,5602
«Исходная Fe 1 мг/л»	12,7252
«Обработанная 1 Fe 1 мг/л»	12,7752
«Исходная Fe 10 мг/л»	21,8992
«Обработанная Fe 10 мг/л»	21,6082
«Исходная Fe 100 мг/л»	114,8152
«Обработанная 1 Fe 100 мг/л»	114,9662
«Обработанная 2 Fe 100 мг/л»	112,6752

Таблица 3.21 – Содержание меди в пробе

Проба	Cu, мг/л
Дист. вода	1,9218
«Исходная Cu 1 мг/л»	2,9848
«Обработанная Cu 1 мг/л»	2,9998
«Исходная Cu 10 мг/л»	11,4078
«Обработанная Cu 10 мг/л»	11,5268
«Исходная Cu 100 мг/л»	97,7218
«Обработанная 1 Cu 100 мг/л»	93,4778
«Обработанная 2 Cu 100 мг/л»	97,9278
«Обработанная 3 Cu 100 мг/л»	94,9738

Таблица 3.22 – Содержание цинка в пробе

Проба	Zn, мг/л
Дист. вода	1,9556
«Исходная Zn 1 мг/л»	2,9036
«Обработанная Zn 1 мг/л»	2,9116
«Исходная Zn 10 мг/л»	12,9596
«Обработанная Zn 10 мг/л»	12,4816
«Исходная Zn 100 мг/л»	113,0136
«Обработанная 1 Zn 100 мг/л»	107,5226
«Обработанная 2 Zn 100 мг/л»	110,0886
«Обработанная 3 Zn 100 мг/л»	108,7506

На основе анализа результатов проведенных опытов можно сделать
ВЫВОДЫ:

1. Если в модельном растворе содержатся соли только одного металла (железа, меди, цинка), эффекта воздействия НЭМИ нет при любых концентрациях (0,1, 1, 10, 20, 100 мг/л).

2. Время обработки НЭМИ не оказало существенного влияния на эффект воздействия.

ГЛАВА 4. ВОЗДЕЙСТВИЕ НЭМИ НА ПУЛЬПУ ИЗ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ

В данной главе рассмотрено еще одно направление – воздействие НЭМИ на пульпу из золотосодержащей руды. Возможность применения электрического разряда для дробления горных пород впервые представлена в работах Л.А. Юткина [126]. Электрогидравлический эффект Юткина внедрен во многие области производства: в машиностроительную, металлургическую, горно-геологоразведочную и др. С развитием электроники сконструированы более энергоемкие генераторы с малой длительностью импульса. Использование импульсов длительностью порядка 1 нс позволяет получить большую энергию в импульсе, более тонкое воздействие на обрабатываемое вещество, из-за чего не наблюдается перегрев электродной системы и не происходит видимый электрический разряд. Большой вклад в изучение электроимпульсного воздействия на руду внесли: В.А. Чантурия, И.Ж. Бунин, В.Д. Лунин, М.В. Рязанцева, С.А. Гончаров, П.П. Ананьев, В.П. Бруев, В.Ю. Иванов, А.С. Самарханова, Г.В. Седельникова, Г.С. Крылова и др. Применение электромагнитного воздействия как способ быстрого разрушения тонкодисперсных минеральных комплексов при переработке труднообогатимой руды представляет особый интерес.

В данной работе были проведены эксперименты по воздействию НЭМИ в процессе выщелачивания на пульпу из золотосодержащей руды карьера АО НПФ «Башкирский золотодобывающий комбинат» (АО НПФ «БЗК»). Технологический процесс переработки руды состоит из четырех этапов:

1. Дробление.
2. Измельчение.
3. Цианирование.
4. Фильтрация с получением цинкового концентрата.

Эксперименты по обработке пульпы НЭМИ были проведены после второго этапа. Использовали разные виды упорных золотосодержащих руд ТЮК 3, ТЮК 4, ПЗ-2. Лабораторная установка представлена на рисунке 4.1.

Электродная система представляет собой излучатель-электрод и проводящий сосуд из нержавеющей стали марки 08X18H10. Выход центральной жилы кабеля от генератора подключается к пусковому излучателю-электроду стержня, а оплетка кабеля подключается непосредственно к стенке ёмкости. Стержень помещается в ёмкость с обрабатываемой пульпой. Диаметр сосуда – 95 мм, высота – 110 мм.

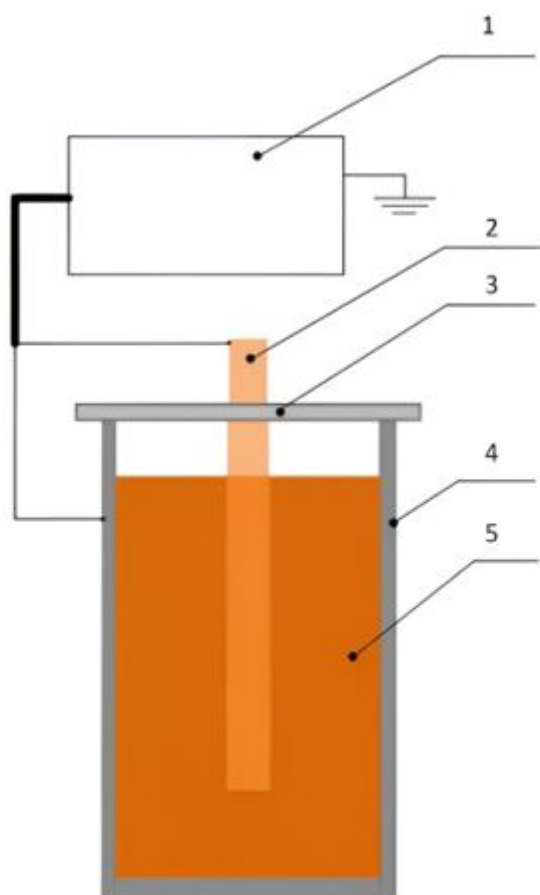


Рисунок 4.1 – Экспериментальная установка: 1 – генератор НЭМИ; 2 – пусковой излучатель-электрод; 3 – фиксатор; 4 – металлический сосуд – заземленный излучатель-электрод; 5 – обрабатываемая пульпа

Были использованы излучатели-электроды:

- из графита с круглым сечением диаметром 6 мм, длиной 120 мм;
- медной спирали (диаметр – 0,4 мм), намотанной на стержень из пластмассы (диаметр – 6,8 мм, длина – 75 мм), с числом витков примерно 160.

В экспериментах в качестве источника электромагнитных импульсов использовался генератор с параметрами: длительность импульса – 1 нс, амплитуда импульса – 15 кВ, частота повторения импульсов – 1 кГц.

4.1 Обработка НЭМИ пульпы из сульфидной золотосодержащей руды ПЗ-2 с добавлением NaCN

Общее содержание металлов в руде ПЗ-2: золота – 2,80 г/т, серебра – 9,00 г/т, меди – 50 г/т, цинка – 400 г/т.

Опыт 1.

Пульпу получили из 500 мл водного раствора концентрацией NaCN 3 г/л, NaOH 0,6 г/л и 250 г сухой руды. Внутри сосуда помещался излучатель-электрод из графита диаметром 6,5 мм, длиной 85 мм. Время обработки – 10 мин. Перемешивали раствор через 5, 10 мин. Измерение содержания элементов проводили каждый час в течение 5 ч после обработки. Результаты представлены в таблице 4.1.

Опыт 2.

Обработка проводилась в условиях опыта 1. Время обработки – 20 мин. Перемешивали раствор через 5, 10, 15 мин. Измерение содержания элементов проводили каждый час в течение 5 ч после обработки. Результаты представлены в таблице 4.1.

Опыт 3.

Обработка проводилась в условиях опыта 1 с использованием в качестве излучателя-электрода медной спирали диаметром 0,4 мм, намотанной на стержень из пластмассы диаметром 6,8 мм, длиной 75 м. Число витков ≈ 160 . Время обработки – 15 мин. Перемешивали раствор через 5, 10 мин. Измерение содержания элементов проводили через 1, 3, 6, 12 ч после обработки. Результаты представлены в таблице 4.1.

Из данных таблицы следует, что наблюдается максимальный выход золота в раствор цианида натрия у обработанных образцов через 3 ч: в исходной пробе $Au = 0,52$ г/т, в обработанной пробе $Au = 0,56$ г/т; а

максимальный выход в раствор серебра через 5 ч: в исходной пробе $Ag = 2,98$ г/т, в обработанной пробе $Ag = 3,06$ г/т. На рисунке 4.2 представлен выход металлов в раствор в процентах.

Таблица 4.1 – Содержание элементов пульпы из золотосодержащей руды ПЗ-2 с добавлением NaCN

Через 1 час	Пробы	Au, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л
	Исходная	0,34	2,7	11,08	2,44
	Обработанная 10 мин	0,44	2,74	10,92	2,70
	Обработанная 20 мин	0,48	2,64	11,00	2,74
	Обработанная с медной спиралью	0,5	2,78	11,14	2,74
Через 2 часа	Пробы	Au, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л
	Исходная	0,5	2,66	11,74	2,44
	Обработанная 10 мин	0,44	2,78	11,74	2,30
	Обработанная 20 мин	0,56	2,74	11,15	2,62
	Обработанная с медной спиралью	0,5	2,84	11,11	2,64
Через 3 часа	Пробы	Au, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л
	Исходная	0,52	2,82	11,27	2,08
	Обработанная 10 мин	0,48	2,94	11,19	2,24
	Обработанная 20 мин	0,5	2,86	11,09	2,38
	Обработанная с медной спиралью	0,56	2,9	11,06	2,36
Через 4 часа	Пробы	Au, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л
	Исходная	0,48	2,82	10,97	2,06
	Обработанная 10 мин	0,54	2,92	11,01	2,20
	Обработанная 20 мин	0,5	2,9	11,03	2,32
	Обработанная с медной спиралью	0,52	2,92	11,01	2,32
Через 5 часов	Пробы	Au, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л
	Исходная	0,44	2,98	11,12	2,06
	Обработанная 10 мин	0,54	3,04	11,07	2,08
	Обработанная 20 мин	0,54	3,02	11,01	2,32
	Обработанная с медной спиралью	0,5	3,06	11,09	2,32

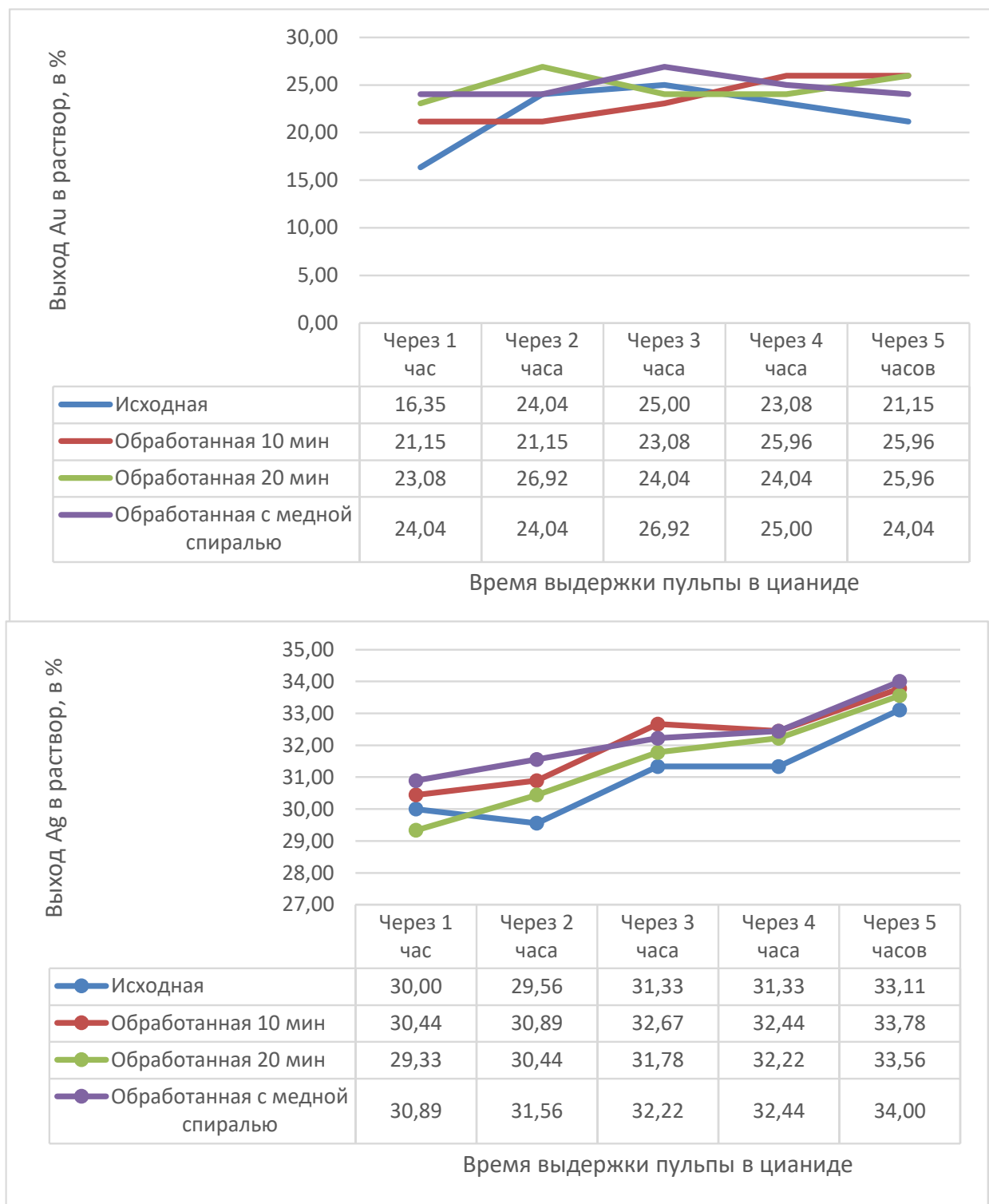


Рисунок 4.2 – Выход металлов в раствор (в %) в зависимости от времени выдержки пульпы в цианиде натрия

По полученным результатам можно сделать выводы:

1. Через 1 ч выход золота в обработанном образце на 7 % выше, чем в исходном.

2. Если выдержать пульпу в растворе по технологии 5 ч, то выход золота в раствор в обработанном образце будет на 2...4 % выше, чем в исходном.

3. Время обработки существенно не влияет на выход металлов в раствор (проверка осуществлялась в течение 10 и 20 мин). Однако эти результаты находятся в пределах погрешности, поэтому было решено дальнейшие эксперименты делать на водной основе: пульпу получали из руды и дистиллированной воды.

4.2 Обработка НЭМИ пульпы из сульфидной золотосодержащей руды ПЗ-2 и дистиллированной воды

Общее содержание металлов в руде ПЗ-2: золота – 2,80 г/т, серебра – 9,00 г/т, меди – 50 г/т, цинка – 400 г/т.

Опыт 1.

Пульпу получили из 500 мл дистиллированной воды и 250 г сухой руды. Внутри сосуда помещался излучатель-электрод из графита диаметром 6,5 мм, длиной 85 мм. Время обработки – 20 мин. Перемешивали пульпу через 10 мин.

Опыт 2.

Обработка проводилась в условиях опыта 1 с использованием в качестве излучателя-электрода медной спирали диаметром 0,4 мм, намотанной на стержень из пластмассы диаметром 6,8 мм, длиной 75 м. Число витков ≈ 160 . Время обработки – 20 мин. Перемешивали пульпу через 10 мин.

Измерение содержания элементов проводили через 1, 3, 6, 12 ч после обработки. Результаты представлены в таблице 4.2.

Из данных таблицы следует, что при обработке НЭМИ пульпы из руды ПЗ-2 у обработанных образцов наблюдается максимальный выход в раствор цианида натрия золота и серебра вместе через 6 ч: в исходной пробе $Au = 0,56$ г/т, $Ag = 3,34$ г/т, в обработанной пробе $Au = 1,25$ г/т, $Ag = 3,52$ г/т; а максимальный выход серебра в раствор через 12 ч: в исходной пробе $Au = 0,58$ г/т, $Ag = 3,72$ г/т, в обработанной пробе $Au = 0,70$ г/т, $Ag = 4,15$ г/т.

Таблица 4.2 – Суммарное содержание элементов пульпы из золотосодержащей руды ПЗ-2 с добавлением цианида натрия

Через 1 час	Пробы	Au, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л	Cu, г/т	Zn, г/т
	Исходная сухая проба	0,49	2,98	11,34	5,30	18,70	15,60
	Исходная	0,49	2,96	11,38	5,48	16,48	114,20
	Обработанная	0,50	3,04	11,41	5,50	16,66	115,40
	Обработанная с медной спиралью	0,45	3,12	11,44	5,10	26,65	116,03
Через 3 часа	Пробы	Au, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л	Cu, г/т	Zn, г/т
	Исходная сухая проба	0,58	3,28	11,24	5,24	26,42	179,80
	Исходная	0,52	3,12	11,27	5,45	21,02	147,20
	Обработанная	0,49	3,04	11,32	5,44	19,64	142,60
	Обработанная с медной спиралью	0,54	3,54	11,34	4,84	29,85	140,23
Через 6 часов	Пробы	Au, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л	Cu, г/т	Zn, г/т
	Исходная сухая проба	0,56	3,34	11,41	7,10	27,38	207,80
	Исходная	0,52	3,16	11,41	8,26	21,40	176,60
	Обработанная	1,25	3,58	11,38	8,32	23,96	164,80
	Обработанная с медной спиралью	0,65	3,78	11,43	7,58	31,71	166,43
Через 12 часов	Пробы	Au, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л	Cu, г/т	Zn, г/т
	Исходная сухая проба	0,58	3,72	11,54	11,12	42,50	320,50
	Исходная	0,56	3,65	11,53	11,75	30,40	271,50
	Обработанная	0,60	3,64	11,50	8,92	30,80	256,00
	Обработанная с медной спиралью	0,70	4,15	11,50	9,00	47,15	262,73

На рисунке 4.3 представлен выход металлов в раствор, в %.

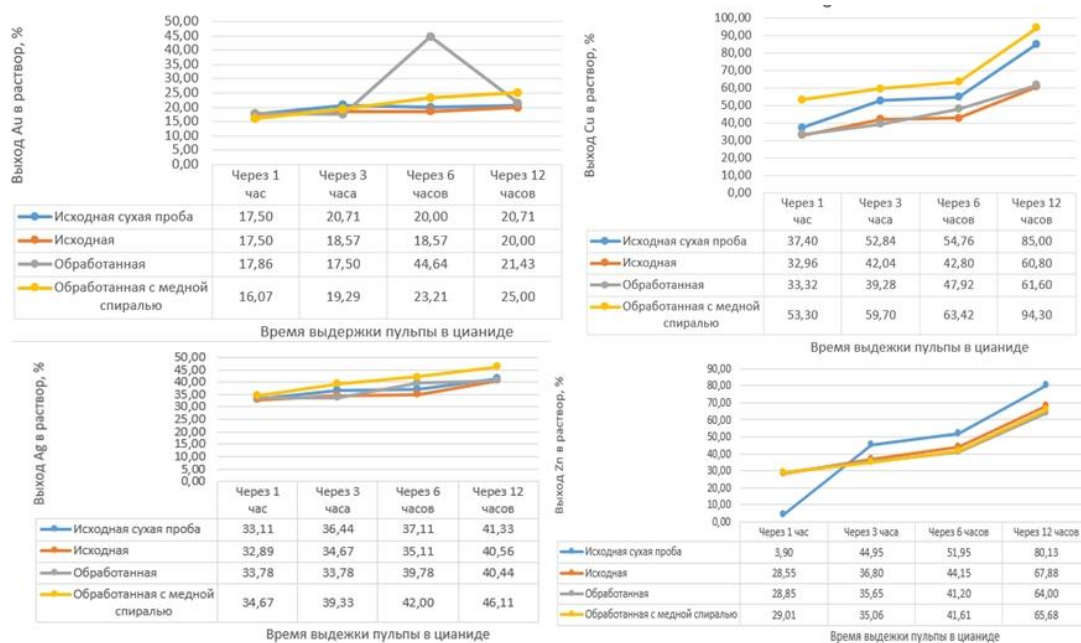


Рисунок 4.3 – Выход металлов в раствор, %

Анализируя данные экспериментов, можно сделать следующие выводы. Через 12 ч после выдержки пульпы в цианиде наблюдается прирост извлечения:

- при ЭС с излучателем-электродом из графита: золота – на 1,43 %;
- при ЭС с излучателем-электродом из медной спирали: золота – на 5,00 %, серебра – на 5,56 %. Выход меди с данным излучателем-электродом мы не оцениваем, т. к. электрод сделан из того же материала.

4.3 Обработка НЭМИ пульпы из золотосодержащей руды ТЮК 4 и дистиллированной воды

Общее содержание металлов в руде ТЮК 4: золота – 3,95 г/т, серебра – 949 г/т, меди – 58 781 г/т, цинка – 2 135 г/т.

Опыт 1.

Пульпу получили из 500 мл дистиллированной воды и 250 г сухой руды. Внутрь сосуда помещался излучатель-электрод из графита диаметром 6,5 мм, длиной 85 мм. Время эксперимента – 20 мин. Перемешивали раствор через 10 мин. Измерение содержания элементов проводили через 1, 3, 6, 12 ч после обработки.

Опыт 2.

Эксперимент проводился в условиях опыта 1. Для увеличения электропроводности обрабатываемой пульпы была добавлена соль NaCl. Объемы солей выбирали из тех соображений, чтобы величина pH пульпы не понижалась до 7, что является оптимальным условием для дальнейшего цианирования.

Опыт 3.

Обработка проводилась в условиях опыта 1 с использованием в качестве излучателя-электрода медной спирали диаметром 0,4 мм, намотанной на стержень из пластмассы диаметром 6,8 мм, длиной 75 м. Число витков ≈ 160 . Результаты опытов представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Суммарное содержание элементов пульпы из золотосодержащей руды ТЮК 4 с добавлением цианида натрия

Через 1 час	Пробы	Аu, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л	Cu, г/т	Zn, г/т
	Исходная	1,04	11,42	11,43	0,54	8 100,07	92,65
	Обработанная	1,03	11,56	11,40	0,50	10 020,06	93,25
	Обработанная с NaCl	1,14	38,72	11,39	1,64	11 550,20	792,65
	Обработанная с медной спиралью	1,08	7,40	11,40	0,50	8 100,07	162,10
Через 3 часа	Пробы	Аu, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л	Cu, г/т	Zn, г/т
	Исходная	1,24	49,50	11,41	1,04	13 600,07	275,20
	Обработан.	1,28	49,25	11,42	1,04	12 665,06	256,90
	Обработанная с NaCl	1,55	79,75	11,58	4,68	11 530,20	461,40
	Обработанная с медной спиралью	1,24	38,56	11,47	0,78	14 900,07	257,90
Через 6 часов	Пробы	Аu, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л	Cu, г/т	Zn, г/т
	Исходная	1,90	8,45	11,19	0,36	35 850,07	62,25
	Обработан.	1,92	9,24	11,20	0,28	9 650,06	63,08
	Обработанная с NaCl	2,00	12,60	11,22	0,32	7 454,20	152,40
	Обработанная с медной спиралью	1,94	8,08	11,14	0,30	7 980,07	138,70

Продолжение таблицы 4.3

Через 12 часов	Пробы	Au, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л	Cu, г/т	Zn, г/т
	Исходная	1,94	21,42	10,87	0,42	15 550,07	64,50
	Обработан.	1,90	20,14	10,85	0,08	22 260,06	63,40
	Обработанная с NaCl	2,04	24,20	10,87	0,40	17 840,20	151,18
	Обработанная с медной спиралью	1,98	21,26	10,83	0,21	15 900,07	141,35

Из данных таблицы можно сделать выводы, что при обработке пульпы из руды ТЮК 4 через 3 ч наблюдается максимальный выход в раствор цианида натрия серебра у обработанного образца: в исходной пробе Au = 1,24 г/т, Ag = 49,50 г/т, в обработанной пробе Au = 1,55 г/т, Ag = 79,75 г/т. На рисунке 4.4 представлен выход металлов в раствор, в %.

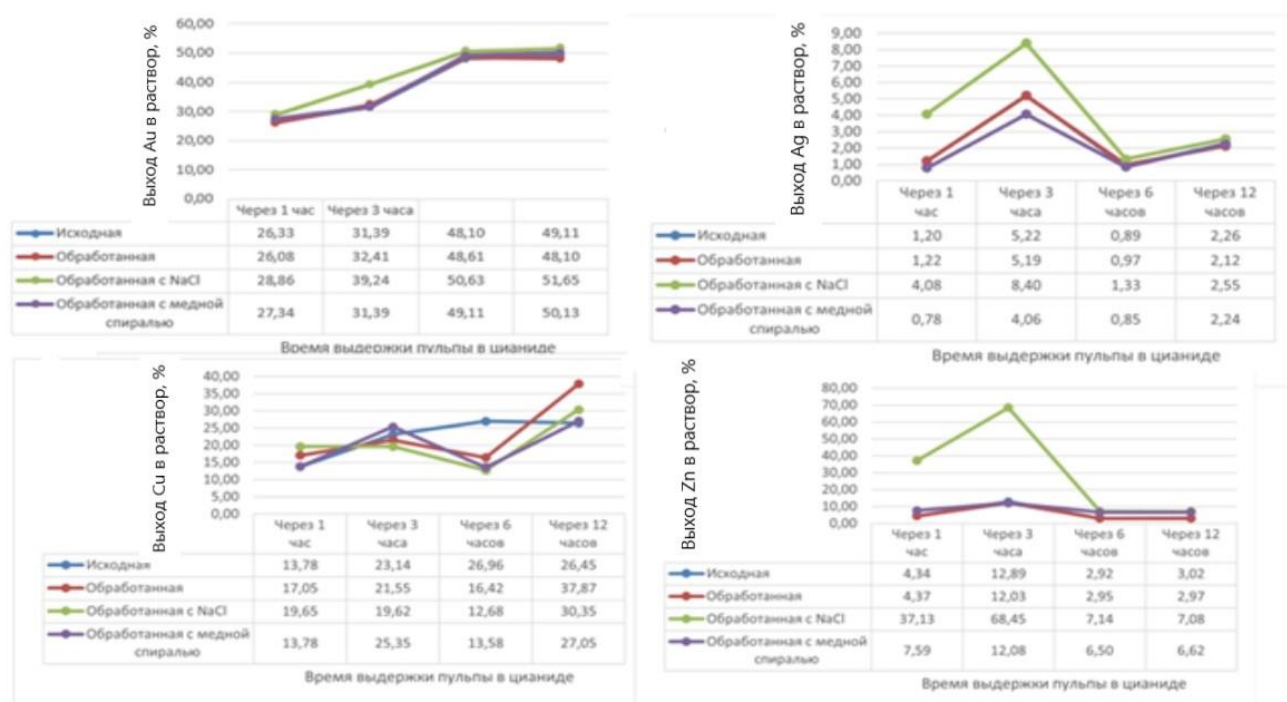


Рисунок 4.4 – Выход металлов в раствор, %

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально установлено, что скорость выщелачивания благородных металлов из пульпы в обработанном образце по отношению к необработанному увеличивается в 1,5 раза. Через 6 ч прирост извлечения для обработанной НЭМИ пульпы относительно необработанной составил: для золота – 7,85 %, цинка – 4,22 %.

2. Добавление хлорида натрия в обрабатываемую пульпу также благотворно влияет на скорость извлечения металлов в раствор: через 3 ч после цианирования прирост выхода золота больше на 7,85 %, серебра – на 3,18 %, цинка – на 55,55 %, чем в образцах без обработки, однако извлечение меди уменьшилось на 3,52 %.

3. Через 12 ч после выдержки пульпы в цианиде у обработанного образца наблюдается прирост извлечения больше, чем у необработанного: золота – на 2,54 %, меди – на 3,9 %, цинка – на 4,06 %.

4.4 Обработка НЭМИ пульпы из золотосодержащей руды ТЮК 3 с добавлением дистиллированной воды

Общее содержание металлов в руде ТЮК 3: золота – 7,86 г/т, серебра – 553,75 г/т, меди – 5 367,47 г/т, цинка – 983,24 г/т.

Опыт 1.

Пульпу получили из 500 мл дистиллированной воды и 250 г сухой руды. Внутрь сосуда помещался излучатель-электрод из графита диаметром 6,5 мм, длиной 85 мм. Время эксперимента – 20 мин. Перемешивали раствор через 10 мин. Измерение содержания элементов проводили через 3, 6, 12 ч после обработки. Результаты представлены в таблице 4.4.

Опыт 2.

Обработка проводилась в условиях опыта 1. Раствор получили из 500 мл дистиллированной воды, 250 г сухой руды с добавлением 50 мл соли BiCl_3 . Перемешивали раствор через 10 мин. В пробе «Обработанная с BiCl_3 с NaOH » величина pH доведена до 10–11 добавлением NaOH в пробу «Обработанная с BiCl_3 ». Измерение содержания элементов проводили через 3, 6, 12 ч после обработки. Результаты представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Суммарное содержание элементов пульпы, образованной из золотосодержащей руды ТЮК 3, с добавлением цианида натрия

Через 3 часа						
Пробы	Au, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л	Cu, г/т	Zn, г/т
Исходная	0,96	23,36	12,08	3,15	2110,0	349,00
Обработанная	1,19	46,39	12,16	3,15	3203,4	552,536
Обработанная с BiCl_3	0,93	15,3	11,96	0,26	7397,626	202,5
Обработанная с BiCl_3 с NaOH	1,62	5,25	12,23	0,28	4090,13	198,42
Через 6 часов						
Пробы	Au, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л	Cu, г/т	Zn, г/т
Исходная	1,02	32,50	11,98	1,90	3125,0	255,00
Обработанная	1,44	55,39	12,13	1,7	3388,4	540,036
Обработанная с BiCl_3	1,04	18,4	11,79	0,21	4097,626	192,84
Обработанная с BiCl_3 с NaOH	1,24	4,22	11,45	0,16	3764,13	190,454
Через 12 часов						
Пробы	Au, г/т	Ag, г/т	pH	CN, г/л	Cu, г/т	Zn, г/т
Исходная	1,60	27,42	10,71	0,26	4145,0	50,6
Обработанная	1,52	28,96	10,58	0,18	4400,9	15,566
Обработанная с BiCl_3	1,49	7,2	10,31	0,20	4125,126	190,32
Обработанная с BiCl_3 с NaOH	0,87	3,22	10,46	0,08	2246,13	190,162

Из данных таблицы можно сделать следующие выводы:

1. Наилучший выход в раствор золота и серебра происходит через 6 ч после заливания цианида натрия: в исходной пробе $\text{Au} = 1,02$ г/т, $\text{Ag} = 32,50$ г/т, в обработанной пробе $\text{Au} = 1,44$ г/т, $\text{Ag} = 55,39$ г/т.

2. Добавление BiCl_3 значительно влияет на выход в раствор меди, через 3 ч $\text{Cu} = 7\,397,626$ г/т. На рисунке 4.5 представлен выход металлов в раствор, в %.

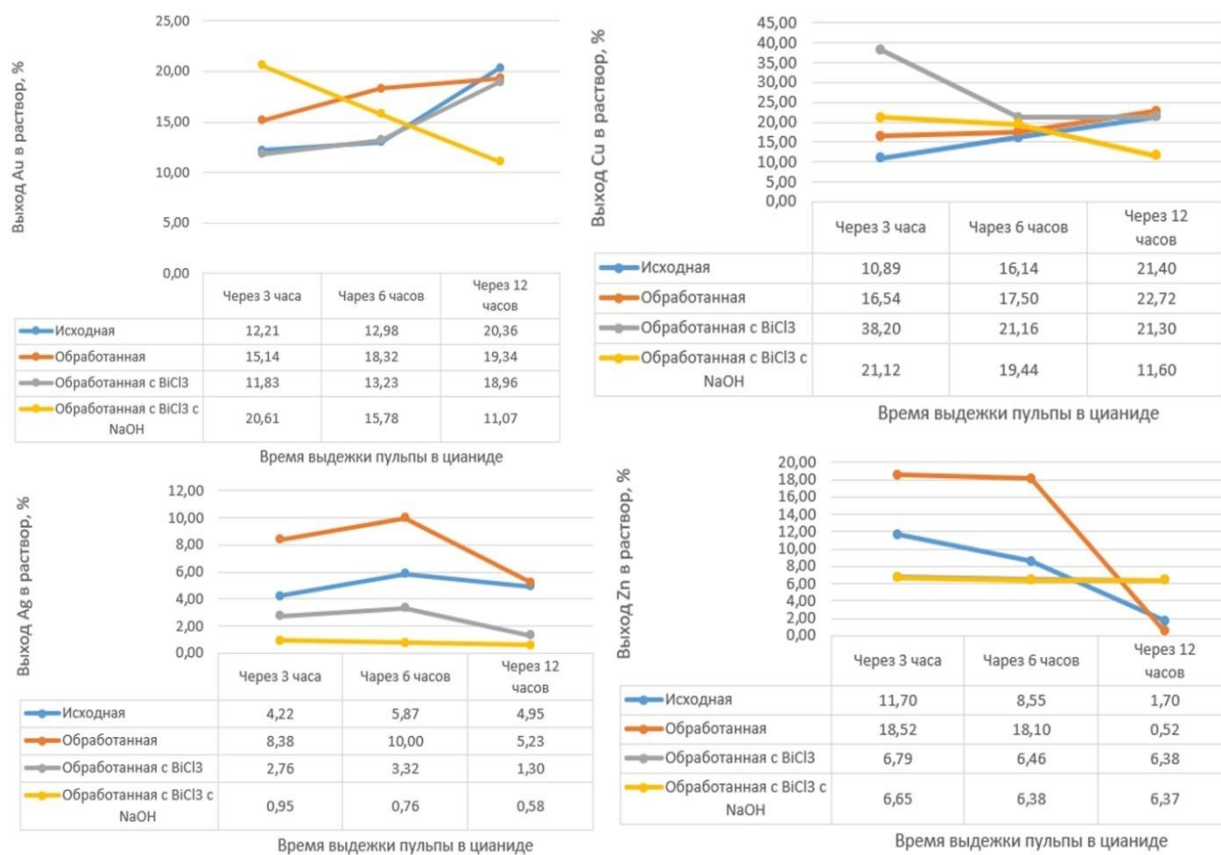


Рисунок 4.5 – Выход металлов в раствор, %

Выводы по полученным результатам:

1. Как и в прошлых экспериментах, воздействие НЭМИ интенсифицирует процесс выхода металлов в раствор по времени (через 3 ч после цианирования):

– в образце «Обработанная» происходит увеличение выхода в раствор золота на 2,93 %, серебра – на 4,16 %, меди – на 5,65 %, цинка – на 6,82 %.

– в образце «Обработанная с BiCl_3 » – резкое увеличение выхода в раствор меди – 27,30 %.

– в образце «Обработанная с BiCl_3 с NaOH » наблюдается увеличение выхода золота и меди в раствор 8,40 % и 10,22 % соответственно. Однако отрицательные показатели с серебром и цинком: уменьшение выхода на 3,27 % и 5,05 % соответственно.

2. Через 6 ч после цианирования наблюдаем:

- в образце «Обработанная» увеличение выхода в раствор золота – на 5,34 %, серебра – на 4,13 %, цинка – на 9,55 %.
- в образце «Обработанная с BiCl_3 » происходит резкий прирост выхода в раствор меди – 27,30 %.

4.5 Разработка установки для обработки НЭМИ пульпы из золотосодержащей руды

Для увеличения выхода в раствор благородных и цветных металлов из золотосодержащих руд была разработана и испытана установка УНИОЗР-01 (установка для наносекундной обработки золотосодержащих руд). Эксперименты проводились по налаженному алгоритму:

1. Образование пульпы из сульфидной золотосодержащей упорной руды и дистиллированной воды.
2. Варьирование pH пульпы.
3. Загрузка обрабатываемой пульпы в установку и подключение к генератору НЭМИ.
4. Обработка пульпы. Варьирование временем обработки.
5. Фильтрация пульпы.
6. Цианирование сухого остатка.
7. Анализ отфильтрованного водного раствора и сухого остатка после цианирования.
8. Оценка результатов.

Обобщенная схема алгоритма показана на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 – Алгоритм работы установки

Основной принцип работы установки УНИОЗР-01 заключается в обработке пульпы из золотосодержащей руды в водном пространстве между электродами, представляющими из себя пластины из стали. Конструкция установки представлена на рисунке 4.7.

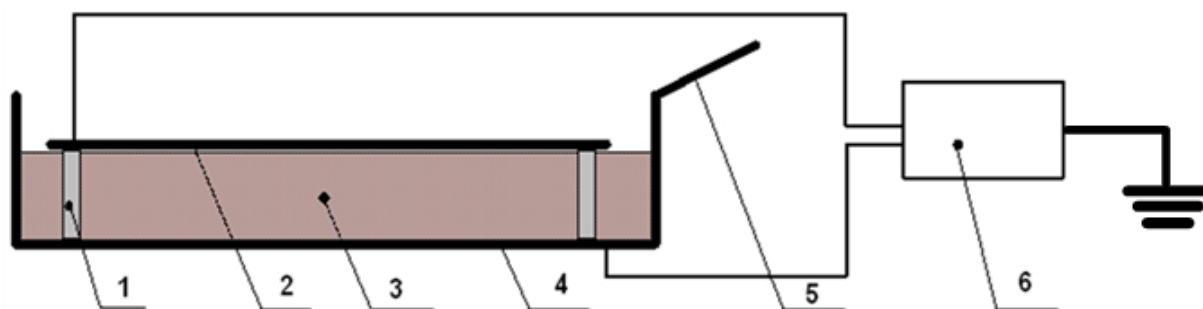


Рисунок 4.7 – Эскиз установки для обработки НЭМИ пульпы из золотосодержащей руды: 1 – диэлектрический бочонок; 2 – пусковой излучатель-электрод; 3 – обрабатываемая пульпа; 4 – заземленный излучатель-электрод; 5 – загрузочный узел; 6 – генератор наносекундных электромагнитных импульсов

Основным элементом установки является электродная система из стальной прямоугольной ёмкости и пластины. Пластина представляет собой

пусковой излучатель-электрод, прямоугольная ёмкость – заземленный электрод. Есть загрузочный узел. Высота ёмкости с загрузочным узлом равна 50 мм, длина 407 мм. Габаритные размеры установки в сборе приведены на рисунке 4.8.

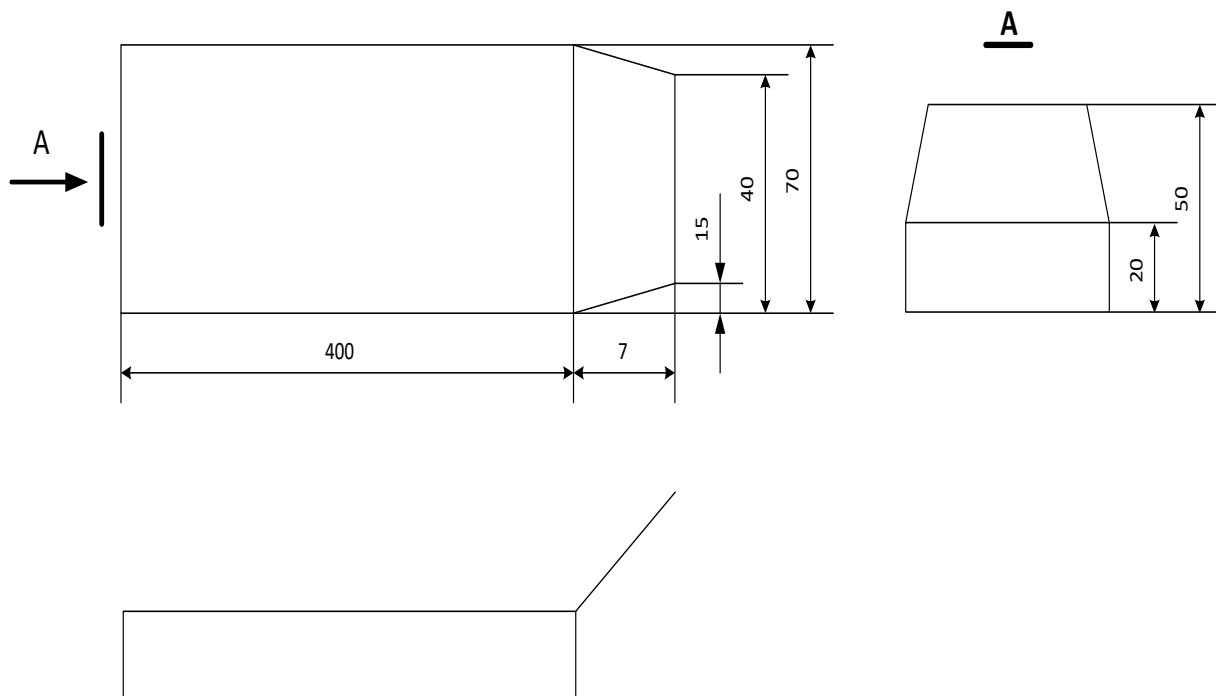


Рисунок 4.8 – Габаритные размеры ЭС

В центре и по краям электродов впаяны провода ПУВ 1×1,5 мм для подключения к генератору НЭМИ. Допустимый объем наполнения емкости равен 250 мл. Объем выбирался исходя из требований лаборатории АО НПФ «БЗК». Пусковой излучатель-электрод съёмный, при работе находится над обрабатываемой рудой на диэлектрических бочонках. Ширина пластины равна 60 мм, длина 370 мм. На рисунке 4.9 представлен чертёж пускового излучателя-электрода.

Для доработки процесса обработки и подбора оптимальных параметров был проведен ряд экспериментов по обработке упорных сульфидных руд из месторождений АО НПФ «БЗК». По разработанному алгоритму готовилась пульпа из золотосодержащей руды и дистиллированной воды, добавлялась щелочь или кислота для получения необходимого значения рН. Далее пульпа загружалась в установку, сверху устанавливался пусковой излучатель-электрод. Подключение генератора к электродам осуществлялось двумя

способами: по центральным и по крайним проводам. Использовался генератор импульсов с параметрами: амплитуда – 15 кВ, длительность – 1 нс, частота повторения – 1 кГц. После обработки пульпа фильтровалась.

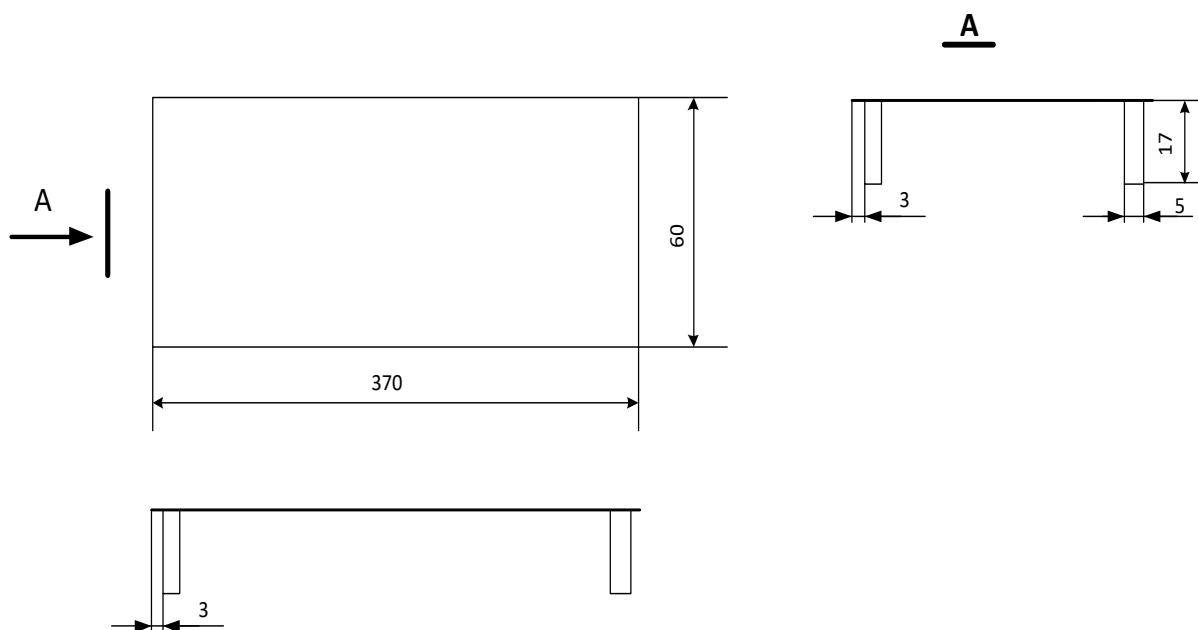


Рисунок 4.9 – Чертёж пускового излучателя-электрода

После первых испытаний установки были внесены следующие дополнения:

- добавление в процесс перемешивание: каждые 5 мин;
- проверка зависимости эффективности обработки от способа подключения генератора к электродам: по центральным проводам или по крайним.

По выбранным оптимальным параметрам и доработке технологического процесса были проведены эксперименты по обработке НЭМИ пульпы из упорной золотосодержащей руды. При комнатной температуре брали 100 г измельченной руды с размером частиц порядка 10 мкм и смешивали с 200 мл дистиллированной воды. Образованная пульпа с рН порядка 6–7, а для получения рН = 12 добавили NaOH. Хорошо перемешав пульпу, влили в ёмкость через загрузочный узел. Далее был установлен пусковой излучатель-электрод. По крайним проводам подключили генератор. Время обработки – 15 мин, с перемешиванием каждые 5 мин. Ёмкость

подключается к оплётке кабеля от генератора импульсов, а пусковой излучатель-электрод – к центральной жиле кабеля. После эксперимента пульпа фильтровалась, исследовался водный раствор и сухой остаток после цианирования. На рисунке 4.10 представлено фото в процессе фильтрации обработанной пульпы.



Рисунок 4.10 – Процесс фильтрации пульпы

В результате экспериментов выявлено, что при подключении генератора к пусковому излучателю-электроду по крайним проводам прирост выхода в раствор металлов в отфильтрованном водном растворе в 2...3 раза больше, чем при подключении по центральным проводам.

Патентный поиск последних 10 лет [127–138] демонстрирует активное использование и развитие электроимпульсной технологии для извлечения цветных и драгоценных металлов из упорных руд (таблица 4.5).

Одним из близких прототипов нашей лабораторной установки является экспериментальная установка для обработки руды мощными электромагнитными импульсами УОМЭП-1, разработанная в УРАН ИПКОН РАН (рисунок 4.11) [154].

Таблица 4.5 – Перечень патентов по РФ по критерию «электромагнитное воздействие на руду».

Год	Название документа	Код
2010	Способ переработки материалов, содержащих благородные металлы	RU 2 176 558 C1
2010	Устройство для переработки материалов, содержащих благородные металлы	RU 2 383 391 C1
2010	Способ извлечения металлов из руд и устройство для его осуществления	RU 2 391 418 C1
2012	Способ кучного выщелачивания окисленных и смешанных медно-цинковых руд	RU 2 453 697 C1
2015	СВЧ-установка для дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов	RU 152661 U1
2016	Способ комбинированной разработки руд	RU 2 585 293 C1
2016	Способ кучного выщелачивания золота из упорных руд и техногенного минерального сырья	RU 2 585 593 C1
2018	Способ извлечения ультрадисперсных частиц золота из упорных углеродистых руд	RU 2 648 400 C1
2019	Способ извлечения благородных металлов из руд и концентратов	RU 2 689 487 C1
2020	Способ селективного управления свойствами руд благородных металлов	RU 2 711 428 C2
2020	Способ электромагнитной рудоподготовки и устройство для его осуществления	RU 2 739 234 C1
2021	Способ обогащения железных руд	RU 2 773 491 C1

Обработка минерального сырья происходит следующим образом: сырье через бункер-накопитель попадает в транспортную ленту, которая представляет из себя подвижный заземленный электрод. Над подвижным электродом расположен пусковой электрод. Высоту и ширину обрабатываемого сырья в ленте регулируют с помощью специального вала и ракеля. Электроды подключаются к генератору импульсов. Обработанный материал поступает в бункер-накопитель. Возможна обработка минерального сырья в сухом или увлажненном состоянии. Параметры импульсов: длительность – 10...30 нс, амплитуда – 40 кВ, энергия в одном импульсе – 0,1 Дж, частота – 100 Гц. При таких параметрах прирост извлечения золота составляет 5...80 %, серебра – 20...47 % [154].

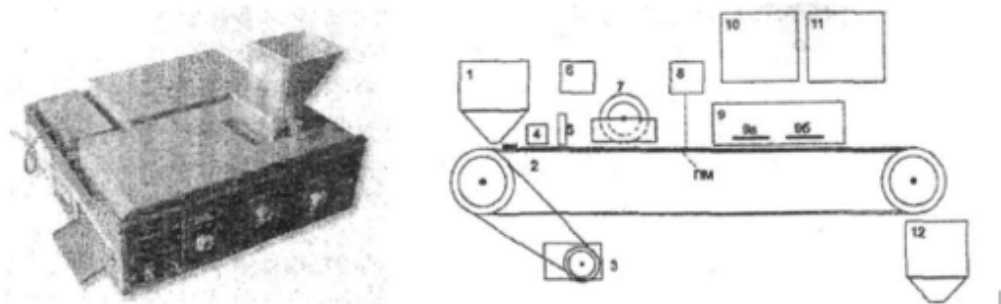


Рисунок 4.11 – общий вид и блок-схема модульного образца опытной экспериментальной установки для обработки минеральных продуктов наносекундными мощными электромагнитными импульсами: 1 – бункер для загрузки материала, 2 – транспортер – подвижный электрод, 3 – электропривод; технологические блоки: 4, 5 – предварительной формовки по ширине и высоте, 6 – увлажнения породы, 7 – окончательной формовки потока породы, 8 – изменения уровня потока минерала; 9 – блок электродов и формирователя МЭМИ; 10 – генератор импульсов; 11 – преобразователь напряжения; 12 – бункер-накопитель обработанной породы

Отличия установки УНИОЗР-01 от УОМЭП-1 приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Сравнительный обзор установок УНИОЗР-01 и УОМЭП-1

Параметры	УНИОЗР-01	УОМЭП-1
Амплитуда напряжения, кВ	До 15	40
Длительность импульса, нс	Менее 1	10–30
Энергия в одном импульсе, мДж	4,5	100
Частота повторения импульсов, Гц	100–1000	10–300
Потребляемая мощность, Вт	Менее 100	Менее 600

4.6 Техническое описание установки УНИОЗР-01

Назначение

Установка УНИОЗР-01 предназначена для обработки НЭМИ водных растворов с золотосодержащей рудой в исследовательских и опытных целях.

Основные технические характеристики:

1. Тип исследуемого объекта – пульпа из дистиллированной воды и золотосодержащей руды.
2. Максимальная температура жидкости – 40 °С.
3. Максимальный объем обрабатываемого раствора – 250 мл.
4. Максимальная потребляемая электрическая мощность – менее 0,1 кВт.
5. Диапазон работы установки – свыше 5 °С.
6. Масса установки в сборе (без жидкости) – 5 кг.
7. Габаритные размеры установки:
 - длина – 1 м;
 - ширина – 0,5 м;
 - высота – 0,3 м.

Комплектность

Установка УНИОЗР-01 в сборе без генератора импульсов – 1 шт.;
техническое описание и инструкция по эксплуатации – 1 шт.

Устройство и принцип работы

Установка УНИОЗР-01 состоит из трёх узлов, соединенных между собой:

- прямоугольная стальная ёмкость;
- пусковой излучатель-электрод;
- генератор импульсов.

Функционирование установки в процессе обработки золотосодержащей руды происходит следующим образом. Ёмкость подключается к оплетке кабеля, а пусковой излучатель-электрод – к центральной жиле кабеля. Кабель подключается к генератору. Обрабатываемая пульпа из дистиллированной воды и золотосодержащей руды поступает в прямоугольную ёмкость. Сверху устанавливается пусковой излучатель-электрод, далее подключается генератор. Во время эксперимента, через 5 мин после начала обработки, генератор выключается, снимается пусковой излучатель-электрод и перемешивается пульпа, затем электрод

устанавливается обратно и включается генератор. После окончания процесса пульпа сливается через загрузочный узел в отдельную ёмкость для фильтрации. Далее отфильтрованный водный раствор и сухой остаток после цианирования отправляются на анализ.

Проведение обработки пульпы

Перед началом работ необходимо проверить узлы и электрические соединения и провода, не допускается наличие узлов на проводах и оголенных токопроводящих жил.

При начале работы генератор должен быть выключен.

Обработка золотосодержащей пульпы НЭМИ:

а) готовится пульпа из золотосодержащей руды и дистиллированной воды в соотношении: 100 г и 200 мл соответственно. Для варьирования pH пульпы добавляется щелочь или кислота;

б) производится заполнение обрабатываемой пульпы в ЭС. Максимальный объем пульпы – 250 мл;

в) над обрабатываемой пульпой устанавливается пусковой излучатель-электрод;

г) производится подключение к генератору;

д) включается генератор импульсов;

е) производится перемешивание пульпы каждые 5 мин:

- отключается генератор;
- отсоединяется от генератора и снимается пусковой излучатель-электрод;

- пульпа перемешивается;

- устанавливается пусковой излучатель-электрод и подключается к генератору;

- включается генератор.

ж) для завершения процесса обработки отключается и отсоединяется генератор;

з) снимается пусковой излучатель-электрод, и через разгрузочный узел выливается обработанная пульпа.

После проведения работ необходимо:

- проверить узлы и электрические соединения и провода;
- промыть ёмкость и пусковой излучатель-электрод под струей воды.

ГЛАВА 5. ОБОБЩЕНИЕ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе разработки теоретических основ влияния НЭМИ на воду с разной концентрацией металлов и золотосодержащую руду в водной среде применялись два подхода. Первый подход связан с изменением свойств воды под действием электромагнитных импульсов, который называют радиолизом воды. Второй подход связан с образованием оксидов железа, меди и других металлов на поверхности руды под воздействием НЭМИ на пульпу из золотосодержащей руды.

5.1 Воздействие НЭМИ на водную среду

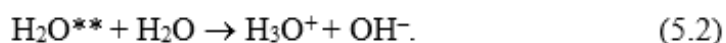
Полученные результаты воздействия НЭМИ на водную среду схожи эффектом радиолиза водной среды с возникновением гидратированных электронов. Независимо от вида излучений, при радиолизе по пути первичного электрона возникают шпоры – мельчайшие локализованные области, где содержится от одной до нескольких ионизированных или дислоцированных молекул воды. Выделяются три основные фазы: физическая, физико-химическая и химическая.

На начальном этапе наблюдаются возбуждение и ионизация заряженной частицей, а также поглощение быстрого электрона, α -частицы и гидратация термализованного электрона. В результате этих явлений происходит гидратация термализованного электрона. Электростатические взаимодействия между различными частицами, включая ионы и молекулы, приводят к образованию сольватов через процесс сольватации. Сольватом называют сгусток поляризованных молекул, радикалов или ионов в виде шара, которые под воздействием положительного заряда притягиваются к электрону, формируя оболочку вокруг него. Уровень напряженности этого

образования зависит от размера поляризованных объектов и варьируется в пределах $10^8 \dots 10^{10}$ В/м. Сольват можно рассматривать как «сгусток» потенциальной энергии, заключенной в данном структурном образовании.

Формирование комплекса может происходить также около положительно заряженных ионов. Физическая стадия этого процесса длится примерно $10^{-16} \dots 10^{-11}$ с. По окончании этого этапа, когда ионизирующая частица проходит через воду, возникают возбужденные (H_2O^*), а также сверхвозбужденные (H_2O^{**}) молекул воды. В этот момент формируются заряды водорода (H_2O^+) и возбужденные вторичные электроны [144].

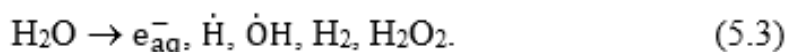
На втором этапе наблюдается разъединение возбужденных состояний и переходных молекул:



Длительность этого этапа составляет $10^{-13} \dots 10^{-9}$ с.

На третьем этапе происходят взаимодействия между радикалами, полученными на физическом и физико-химическом этапах. Этот этап длится $10^{-10} \dots 10^{-7}$ с.

В главе 1 показано, что процесс радиолитического разложения воды можно выразить схемой:



Гидратированный электрон является практически главным продуктом радиолитического разложения воды. В ходе продолжительных экспериментальных исследований был выявлен его окислительно-восстановительный потенциал, который составил $-2,7$ В [139]. Отсюда следует, что гидратированный электрон является самым простым и эффективным восстановителем, соответственно, в процессе радиолитического разложения он играет ключевую роль, реагируя большинством продуктов радиолитического разложения. Рассмотрим классификацию этих реакций, выделив три основных типа:

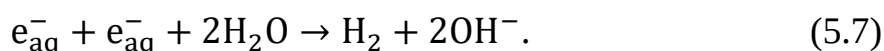
1. Присоединение e_{aq}^- к ионам (простое восстановление):



Одна из наиболее важных реакций этого типа – реакция образования атома H^0



к этому же типу относится реакция



Восстановление различных ионов металла может происходить с помощью гидратированного электрона. Это явление наблюдается, когда окислительно-восстановительный уровень пары $S^{n+}/S^{(n-1)+}$ менее отрицательный по значению, чем у гидратированного электрона e_{aq}^- .

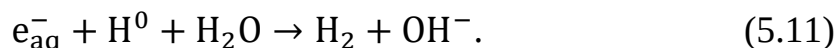
2. Присоединение к нейтральным молекулам. Общая формула:



Продукты этих реакций (анион радикалы) более или менее стабильны:



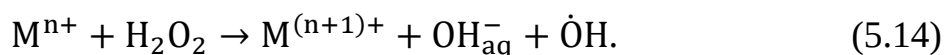
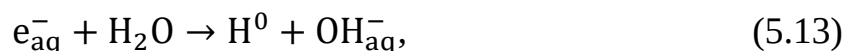
При взаимодействии гидратированного электрона e_{aq}^- с H^0 в воде возникает H_2 по реакции



3. Диссоциативное присоединение (общее уравнение):



Диссоциативное присоединение гидратированного электрона e_{aq}^- происходит в случае любых веществ, являющихся донорами протонов. В результате реакций с донорами протонов образуются атомы. Например:



В работе [139] приведены некоторые химические реакции с гидратированным электроном. Так как в этой работе были описаны примеры уменьшения в обработанной воде ионов переходных металлов, приведем примеры реакций гидратированного электрона с ними. Авторы приводят, что e^-_{aq} вступает в реакцию с ионами металлов переходной группы, в частности Cu(II), Mn(II), Fe(II), Cr(II), Co(II) и Ni(II), с высокими скоростями. Если оценивать скорость реакции с общей точки зрения, то в основном она зависит от состава металл-лиганд. Далее авторы приходят к выводу, что молекула воды может быть и частью гидратной сферы гидратированного электрона, и лигандом, поэтому в электронном переносе молекулы воды могут играть роль «моста». За счет этого реакционная способность аквакомплексов увеличивается.

В результате реакции гидратированного электрона с двухвалентным ионом переходных металлов происходит переход валентности металла в меньшую сторону. В этой же работе авторы приводят подтверждение перехода ионов Mn^{2+} и Zn^{2+} в ионы Mn^+ и Zn^+ после взаимодействия с гидратированным электроном методом УФ-спектроскопии. По этой теории можем обосновать осаждение ионов Mn, Fe, Cu и уменьшение их содержания в пробах, обработанных НЭМИ. Конкретные показатели приведены в таблицах 3.4–3.7, 3.9–3.11 этой работы.

Напротив, сульфиты SO_3^{2-} и сульфаты SO_4^{2-} реагируют с гидратированным электроном при низких скоростях, порядка $10^{-6} \text{ M}^{-1} \text{ c}^{-1}$, поэтому не следует ожидать уменьшения их количества в растворах [139]. Видим подтверждение в таблице 5.3, после обработки сточной воды Учалинского ГОК наносекундными электромагнитными импульсами уменьшение сульфатов не наблюдается.

В исследовании [111] рассматривалась особенность радиолиза воды, связанная с изменением валентного состояния атомов металла. Наблюдалось снижение концентрации ионов Fe^{+3} , что вело к увеличению уровня Fe^{+2} в водном растворе. Экспериментальная часть работы подтверждала данную

гипотезу. Для анализа использовался раствор сернокислого железа. Эксперимент проводили в условиях с рН, равным 1. После обработки оба образца – исходный и обработанный – были отправлены на исследование для измерения концентрации ионов железа в растворе, результаты анализа приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Содержание ионов железа, мг/л

Ион	Исходный образец	Обработанный образец	Изменение
Fe^{+2}	35,0	35,8	+ 0,8
Fe^{+3}	1,58	0,78	– 0,8

Анализ полученных данных указывает на восстановление ионов железа (III) и железа (II). Далее авторы приводят расчеты и вывод, что за время обработки 20 мин раствором был поглощен 51 Дж энергии, что соответствует средней мощности в 0,04 Дж/с, а это в свою очередь соответствует поглощенной дозы в 4 рад/с. В результате исследования авторы делают вывод, что влияние НЭМИ сопоставимо с воздействием значительных доз γ -радиации.

Для оценки соответствия установленным нормам по разрешенным параметрам индикаторов, относящимся к качеству питьевых и сточных вод, будут представлены сравнительные графики. В частности, таблица 5.2 отражает характеристики предельно допустимых концентраций (ПДК) и содержание различных веществ в образцах, обработанных методом НЭМИ, что позволит оценить качество питьевой воды по стандартным требованиям. Данные помогут определить, насколько точно мы приближаемся к заданным нормативам.

Для сравнения того, насколько приближаемся к стандартам по допустимым значениям нормативных показателей питьевых и сточных вод, приведем таблицы сравнения показателей ПДК и содержания элементов в пробах после обработки НЭМИ. Для сравнения того, насколько приближаемся к стандартам по допустимым значениям нормативных показателей питьевых

вод, приведем показатели ПДК и после обработки НЭМИ питьевой воды (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Сравнение результатов обработки питьевой воды с показателями СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»

Наименование вещества	Величина ПДК	Обработка артезианской воды (табл. 3.4 по диссертации)	Обработка питьевой воды с pH = 6,5 из скважины Карамовского месторожден. ЯНАО	Обработка питьевой воды с pH=2,2 из скважины Карамовского месторожден. ЯНАО	Обработка питьевой воды (табл. 3.7 по диссертации)
Медь (Cu, суммарно), мг/л	1,0	0,011	–	–	0,0044
Железо (Fe, суммарно), мг/л	0,3	0,047	1,318	19,35	0,0055
Марганец (Mn, суммарно), мг/л	0,1	0,032	–	–	–
Цинк (Zn, суммарно), мг/л	5,0	–	–	–	–

По данным таблицы видим, что для очистки питьевой воды Карамовского месторождения ЯНАО необходимы дополнительные методы очистки, т. к. воздействие НЭМИ не доводит качество воды до необходимого показателя ПДК железа.

В таблице 5.3 представлено сравнение показателей ПДК сточных вод и содержания ионов металлов, сульфатов в сточной воде на входе и выходе очистных сооружений Учалинского горно-обогатительного комбината после обработки НЭМИ.

Таблица 5.3 – Сравнение результатов обработки сточных вод с показателями максимальных допустимых значений нормативных показателей общих свойств сточных вод и концентраций загрязняющих веществ в сточных водах

Наименование вещества	Величина ПДК, мг/л	Обработка сточной воды (табл. 3.9 по диссертации), мг/л	Обработка производственной воды на выходе УГОК (табл. 3.10 по диссертации), мг/л		Обработка производственной воды на входе УГОК (табл. 3.10 по диссертации), мг/л	
			pH = 8,03	pH = 9,5	pH = 5,59	pH = 9,5
Медь (Cu, суммарно), мг/л	1,0	0,01	0,029	0,020	5,67	0,033
Железо (Fe, суммарно), мг/л	5,0	0,02	0,035	0,039	0,236	0,068
Марганец (Mn, суммарно), мг/л	1	–	0,19	0,019	19,2	0,019
Цинк (Zn, суммарно), мг/л	1	0,15	0,253	0,008	146,03	0,807
Алюминий (Al, суммарно), мг/л	5	0,02	–	–	–	–
Сульфаты (SO ₄)	1000,0	98,1	2883,3	2477,8	2550,0	2447,3

В результате можем сделать вывод, что обработка НЭМИ сточной воды уменьшает концентрацию металлов до показателей ПДК, но для очистки от сульфатов необходимы дополнительные способы очистки.

5.2 Воздействие НЭМИ на пульпу из золотосодержащей руды

Основоположники применения электрических разрядов в технологии извлечения металлов из руд представлены в главе 4.

В этой части работы приводится теоретическое положение влияния НЭМИ на руду, что подтверждается результатами, представленными в работах [145–152]. Примечательно предположение о формировании соединений металлов и элементов на поверхности минералов под воздействием электромагнитного излучения. Также возможен эффект электрического пробоя руды, приводящего к разрушению минералов и их вскрытию, как указано в [150,151]. Основной аспект заключается в том, что конденсация газов металлов и серы формирует новые наноструктуры оксидов различных металлов на поверхности этих минералов. От величины электромагнитного излучения зависят как структурный, так и качественный состав вновь образованных соединений. Процесс структурных изменений следует охарактеризовать через три основных уровня, отражающих состав недавно сформировавшихся соединений.

На первом уровне при частоте импульсов до 10 кГц и энергии в одном импульсе менее 0,1 кДж происходит окисление веществ, что ведет к образованию желездефицитных сульфидов, а также оксидов (гидроксидов) и сульфатов железа, цинка и меди. На поверхности руд минералов также наблюдается образование гидрофобной элементарной серы S^0 и на поверхности минералов – полисульфидной серы S^{2-} .

На следующем уровне, когда частота импульсов составляет $10^3 \dots 5 \cdot 10^3$ Гц и энергия в одном импульсе достигает 0,5 кДж, происходит «процесс обновления» поверхности минерала. В этом процессе фиксируется тепловое удаление элементной и полисульфидной серы, которое происходит в соединении сернистого газа. На данном уровне происходят изменения состава минералов, таких как пирротин, пентландит и халькопирит, а также сульфатов

меди и/или железа в виде соединений типа $Me_x(SO_4)_y$, формирующихся в поверхностных слоях.

При частоте импульса выше 10 кГц и энергии в одном импульсе до 1,0 кДж наблюдается активное окисление сульфидных соединений. Это приводит к образованию таких веществ, как соединения оксидов или гидроксидов и сульфатов. Этот процесс относят к третьему уровню.

Исследование, описанное в статье [152], акцентирует внимание на использовании импульсов продолжительностью от 1 до 50 нс, напряжением до 50 кВ, фронтом длительностью 1 нс и частотой генерации этих импульсов от 10 до 1000 Гц. Электрические импульсы создаются с помощью специализированного разрядного устройства. Применение предварительной обработки минералов методом НЭМИ приводит к образованию микротрещин и проводников выхода в матрице горной породы.

В работе [152] приводится исследование воздействия на упорные руды импульсами длительностью 1...50 нс, амплитудой до 50 кВ, длительностью фронта 1 нс, частотой повторения 10...1000 Гц. Электрические импульсы создаются с помощью специального разрядного устройства. Применение предварительной обработки минералов методом НЭМИ приводит к образованию каналов пробоя микротрещин. В результате таких изменений извлечение драгоценных металлов в процессе цианирования упорных руд увеличивается на 4...12 %, для концентратов прирост составляет 5...45 %, а для хвостов обогатительных предприятий это значение колеблется в диапазоне 30...80 %.

Недостаток этого метода заключается в большом потреблении энергии. В качестве замечания о величине энергии отметим, что здесь речь идет об энергии разрядного устройства. Величина реальной энергии, которая поступает в руду, значительно меньше. Точная оценка её затруднительна.

По проведенным экспериментам нами была разработана пилотная установка по обработке НЭМИ золотосодержащей пульпы с параметрами:

объем ёмкости – 70 л, производительность – 315 кг/ч для пульпы с разной плотностью 1,2; 1,5; 1,7 кг/л (рисунок 5.1).

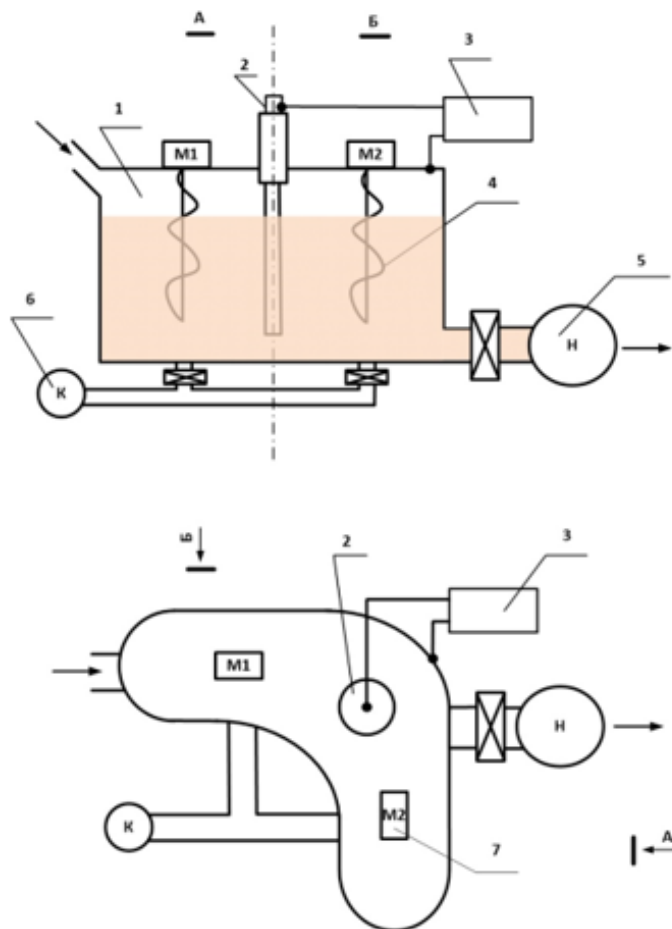


Рисунок 5.1 – Пилотная установка по обработке НЭМИ золотосодержащей пульпы: 1 – ёмкость 0,07 м³; 2 – электрод-излучатель; 3 – генератор НЭМИ; 4 – мешалки шнековидные – 2 шт.; 5 – насос для перекачки пульпы на фильтр мощностью 1,5 кВт; 6 – компрессор производительностью 0,8–1,0 м³/мин, мощностью 1,5 кВт; 7 – электродвигатель 0,5 кВт – 2 шт.

В таблице 5.4 приведен экономический эффект установки при условии:

- используется руда с содержанием Au = 3,95 г/т, Ag = 949 г/т, меди – 50 г/т, цинка – 400 г/т;
- прирост извлечения при обработке НЭМИ для золота – 7,85 %, для серебра – 0,44 %;
- курс Au = 5483 руб/г, Ag = 68,57 руб/г.

Таблица 5.4 – Расчет экономического эффекта от установки НЭМИ по обработке руды

Показатели	Плотность пульпы, кг/л		
	1,2	1,5	1,7
Обрабатываемая масса за год, т	4 205	5 256	5 957
Выход Au без обработки, г	6 601,54	8 251,92	9 352,18
Выход Ag без обработки, г	1 016,64	1 270,80	1 440,24
Выход Au после обработки, г	7 591,77	9 489,71	10 755,00
Выход Ag после обработки, г	1 132,82	1 416,03	1 604,83
Прибыль от Au после обработки, руб.	5 429 433	6 786 792	7 691 697
Прибыль от Ag после обработки, руб.	7 967	9 959	11 287
Прибыль от установки, руб.	5 437 400	6 796 750	7 702 984
Расход электроэнергии в год, кВт	40	40	40
Расход за электроэнергию в год, руб.	124 173	124 173	124 173
Чистая прибыль от установки, руб.	5 313 227	6 672 577	7 578 811

Следует отметить, что за один год работы установка НЭМИ потребит не более 40 000 кВт·ч электроэнергии, из них генератор – всего 438 кВт·ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей диссертационной работе на основе проведенных экспериментальных исследований и разработанных научно-технических положений даны новые решения актуальных научных задач. В ходе выполнения работы получены следующие научные и практические результаты:

1. Экспериментально доказано, что электрические характеристики электродной системы: продольное, волновое сопротивление, коэффициент отражения и сопротивление нагрузки в водной среде и в воздухе – незначительно различаются между собой вне зависимости от материала излучателя-электрода.

2. Экспериментально установлено, что при обработке НЭМИ водной среды, к обрабатываемой среде подводится 90 % энергии от генератора.

3. Разработаны схемные решения электродной системы для повышения флотационных и физико-химических свойств обрабатываемой водной среды, обеспечивающие уменьшение содержания алюминия, железа, цинка, марганца и меди на 10–90 % в питьевой, сточных водах и на входе и выходе очистных сооружений.

4. Установлено, что обработка НЭМИ водных растворов с высокой концентрацией ионов металлов меди и никеля при температуре 90 °С влияет:

- на пространственное построение кристаллов меди;
- образование рентгеноаморфного оксигидроксида железа FeOOH размером 30...50 нм, который в 10 раз меньше, чем в образце без обработки.

5. Создана лабораторная установка для изучения влияния обработки НЭМИ золотосодержащей пульпы на её физико-химические и технологические свойства, апробированная на АО НПФ «Башкирский золотодобывающий комбинат» (патент РФ № 17761 от 02.03.2018).

6. Установлена возможность **практического применения** высоковольтных наносекундных электромагнитных импульсов при

подготовке упорных золотосодержащих руд к цианированию. По результатам работы предложена технология обработки НЭМИ пульпы из упорной золотосодержащей руды, которая позволит получить прирост извлечения золота до 8,4 %, серебра – до 4,16 %, меди – до 27 %, цинка – до 52,56 %.

7. Разработана и представлена пилотная установка по обработке НЭМИ золотосодержащей пульпы, годовое потребление электроэнергии которой составит не более 40 000 кВт·ч (из них генератор потребит всего 438 кВт·ч). Установка может дать чистую прибыль от 5,3 до 7,6 млн руб. в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химическая энциклопедия в пяти томах. – Москва: Советская энциклопедия, 1988-1998. – 3355 с.
2. Физическая энциклопедия / гл. ред. А.М. Прохоров. – Москва : Советская энциклопедия, 1988-1998. – 3474 с.
3. Бахир, В.М. Электрохимическая активация : в 2 частях / В.М. Бахир. – Москва : ВНИИИМТ, 1992. – 256 с.
4. Мирошников, А.И. Изучение параметров анолита растворов хлоридов Li, K, Cs после обработки в диафрагменном электролизере / А.И. Мирошников // Биофизика. – 1998. – Том 43. – Вып. 3. – С. 555–559.
5. Мирошников, А.И. Исследование биологической активности растворов, электрохимически активированных в диафрагменном электролизере / А.И. Мирошников // Биофизика. – 2006. – Том 51. – Вып. 5. – С. 946–951.
6. Лобышев, В.И. Электрохимическая активация воды / В.И. Лобышев, И.Ю. Петрушанко (Попова), В.И. Киселёв // Электрохимическая активация – 2001: Третий Международный симпозиум «Электрохимическая активация в медицине, сельском хозяйстве, промышленности» : доклады и краткие сообщения. – Москва, 2001. – С. 65–69.
7. Леонов, Б.И. Физико-химические аспекты биологического действия электрохимически активированной воды / Б.И. Леонов, В.И. Прилуцкий, В.М. Бахир. – Москва : ВНИИИМТ, 1999. – 244 с.
8. Классен, В.И. Вода и магнит / В.И. Классен. – Москва : Наука, 1973. – 111 с.
9. Каргинтев, А.К. Некоторые особенности шламообразования при магнитной обработке воды / А.К. Каргинтев // Силовые установки и механизмы. – Новосибирск : НИИВТ. – 1967. – Вып. 29. – С. 102–106.

10. Ремпель, С.И. О механизме явлений при магнитной и высокочастотной водоподготовке / С.И. Ремпель, М.Р. Бураков // Водоснабжение: тр. Ак. коммун. хоз-ва. – 1964. – Вып. 30. – С. 187–194.
11. Стукалов, П.С. Магнитная обработка воды / П.С. Стукалов, Е.В. Васильев, Н.А. Глебов. – Ленинград : Судостроение, 1969. – 190 с.
12. Миненко, В.И. Электромагнитная обработка воды в теплоэнергетике / В.И. Миненко. – Харьков : ХГУ, 1981. – 96 с.
13. Дерягин, Б.В. Вода в дисперсных системах / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, Ф.Д. Овчаренко. – Москва : Химия, 1989. – 288 с.
14. Ling, G.N. A new theoretical foundation for the polarized-oriented multilayer theory of cell water and for inanimate systems demonstrating long-range dynamic structuring of water molecules // *Physiol. Chem. Phys. & Med. NMR.* – 2003. – V. 35. – P. 91–130.
15. Pollack, G.H. *Cells, Gels and the Engines of Life.* – Seattle, WA, USA: Ebner & Sons, 2001. – 205 p.
16. Воейков, В.Л. Регуляторные функции активных форм кислорода в крови и в водных модельных системах: диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук. – Москва, 2003. – 280 с.
17. Качалов, Ю.А. Влияние магнитного поля на время жизни тонких пленок / Ю.А. Качалов // Тр. Новочеркасск. политехн. ин-та, 1973. – Т. 270. – С. 63–65.
18. Миненко, В.И. Магнитная обработка водно-дисперсных систем / В.И. Миненко. – Киев : Техника, 1970. – 147 с.
19. Стукалов, П.С. Магнитная обработка воды / П.С. Стукалов, Е.В. Васильев, Н.А. Глебов. – Ленинград : Судостроение, 1969. – 256 с.
20. Классен, В.И. Омагничивание водных систем. – 2-е изд., переработанное и дополненное / В.И. Классен. – Москва : Химия, 1982. – 295 с.

21. Эксплуатация паровых котлов, сосудов и грузоподъемных машин. – Киев : Техника, 1966. – 195 с.

22. Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем : сборник статей Новочеркасского политехнического института, 1975. – 265 с.

23. Патент 93080 U1 Российская Федерация, МПК C02F 1/48. Устройство для магнитной обработки воды в потоке / Барышев М.Г., Ломакина Л.В., Ильченко Г.П., Джимаков С.С. – 2009122038/22; заявл. 2009.06.08; опубл. 20.04.2010.

24. Патент 2012 108 701 А Российская Федерация, МПК G C02F 1/46. Способ одновременной обработки воды электрическим и магнитным полями и устройство для его осуществления / Багич Г.Л. – 2012108701/05; заявл. 11.03.2012; опубл. 20.08.2012.

25. Патент 2012 126 487 А Российская Федерация, МПК A01G 7/00. Способ и устройство для магнитной обработки растений, пищевых продуктов и воды / Тишаков В.Т. – 2012126487/15; заявл. 20.06.2012; опубл. 27.12.2013.

26. Патент 157105 U1 Российская Федерация, МПК C02F 1/48. Устройство для магнитной обработки воды и водных растворов / Саркисов Ю. С., Рябов С.И., Кондратьева Н. М., Горленко Н.П., Семенов В.Д., Семенова Г. Д., Никитина Е.Г. – 2015115411/05; заявл. 23.04.2015; опубл. 20.11.2015.

27. Патент 171986 U1 Российская Федерация, МПК C02F 1/46, C02F 1/48. Устройство для обработки воды электрическим и магнитным полями / Марков Е.А., Шипко М.Н., Сибирёв А.Л., Носов В.Ю. – 2016124518; заявл. 26.09.2016; опубл. 23.06.2017.

28. Патент 2 708 607 С1 Российская Федерация, МПК C02F 1/46, C02F 1/48. Способ магнитно-реагентной обработки сточных вод / Голубев И.А., Голубев А.В. – 2019104036; заявл. 13.02.2019; опубл. 09.12.2019.

29. Патент 198610 U1 Российская Федерация, МПК C02F 1/50, C02F 103/04. Устройство для обработки воды с магнитным креплением / Лузан Д.Е. – 2019144414; заявл. 24.12.2019; опубл. 20.07.2020.

30. Патент 2019 111 555 А Российская Федерация, МПК C02F 1/00. Устройство для магнитной обработки жидкости, в частности воды / Деделис Войтех, Деделис М.Я. – 2019111555; заявл. 17.04.2019; опубл. 19.10.2020.

31. Пикаев, А.К. и др. Импульсный радиолиз и его применение. – Москва : Атомиздат, 1980. – 280 с.

32. Домрачёв, Г.А. Роль звука и жидкой воды как динамически нестабильной полимерной системы в механохимически активированных процессах продуцирования кислорода в условиях Земли / Г.А. Домрачёв, Ю.Л. Родыгин, Д.А. Селивановский // ЖФХ. – 1992. – Т. 66. – № 3. – С. 241–246.

33. Домрачёв, Г.А. Потери энергии звука при сонолизе воды / Г.А. Домрачёв, Д.А. Селивановский, И.Н. Диденкулов // ЖФХ. – 1998. – Т.72. – № 2. – С. 347–352.

34. Кардашев, Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии / Г.А. Кардашев. – Москва : Химия, 1990. – 304 с.

35. Маргулис, М.А. Основы звукохимии / М.А. Маргулис. – Москва : Высшая школа, 1984. – 270 с.

36. Патент 2085273 Российская Федерация, МПК В 7/00, В 11/02. Ультразвуковой активатор / Кладов В.Ф. № 95109892/25, заявл. 20.04.95; опубл. 27.07.97, Бюл. № 24. 01 F01 F

37. Кладов, А.Ф. Кавитационная деструкция материи. – URL:<http://roslo.narod.ru/rao/rao1.htm> (дата обращения: 06.12.12).

38. Патент 2314261 Российская Федерация, МПК C02F1/00. Способ ликвидации отработанных жидких сред / Кармацкий Г.С., Сисин В.Д. – № 2006100729/15, заявл. 10.01.2006, опубл. 27.07.2007, Бюл. № 24.

39. Патент 77098 Российская Федерация, МПК G 9/08, В 01 D 1/00, С 9/00. Установка для комплексной переработки жидких радиоактивных отходов низкого и среднего уровня радиоактивности / Афанасьев В.С.,

Воропай А.С., Кирюхина Н.В., Рамзайцев Г.Н., Сергеев Ю.Ю. – № 2007145215/22; заявл. 07.12.2007; опубл. 10.10.2008.21 F02 F

40. Патент 130602 U1 Российская Федерация, МПК C02F 1/36. Ультразвуковое устройство для очистки водоемов / Вьюгинова А.А., Новик А.А., Новик А.А. – № 2013110091/05; заявл. 06.03.2013; опубл. 27.07.2013.

41. Патент 181669 U1 Российская Федерация, МПК C02F 1/36. Ультразвуковое устройство для очистки водоемов от микробиологических загрязнений / Вьюгинова А.А., Новик А.А. – № 2017129044; заявл. 14.08.2017; опубл. 26.07.2018.

42. Лазаренко, Б.Р. Электрическая эрозия металлов / Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко. – Вып. 1/2. – Москва : Госэнергоиздат, 1944. – 60 с.

43. Радиолиз углеводов (Некоторые физико-химические проблемы / под ред. А.В. Топчиева, Л.С. Полак. – Москва : Изд-во Академии наук СССР, 1962. – 208 с.

44. Кинетика и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме / под ред. Л.С. Полак. – Москва : Наука, 1965. – 256 с.

45. Очерки физики и химии низкотемпературной плазмы / под ред. Л.С. Полак. – Москва : Наука, 1971. – 436 с.

46. Полак, Л.С. Химия плазмы / под ред. Б.М. Смирнова, Л.С. Полак. – Москва : Энергоатомиздат, 1975. – 256 с.

47. Ушаков, В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей / В.Я. Ушаков. – Томск : Изд-во Томского университета, 1975. – 256 с.

48. Sokolov V., Stein G. Photolysis of liquid water at 1470 // The Journal of Chemical Physics. – 1966. – V. 44. – N 5. – P. 1546–1551.

49. Sokolov V., Stein G. Photolysis of liquid water at 1849 // The Journal of Chemical Physics. – 1966. – V. 44. – N 9. – P. 3329–3337.

50. Шамб, У. Перекись водорода / У. Шамб, Ч. Сеттерфилд, Р. Вептвортс. – Москва : Наука, 1958. – 576 с.

51. Наугольных, К.А. Электрические разряды в воде / К.А. Наугольных, Н.А. Рой. – Москва : Наука, 1971. – 156 с.
52. Рязанов, Н.Д. Действие обеззараживающих факторов импульсного электрического разряда в воде / Н.Д. Рязанов, Е.Н. Перевязкина // Электронная обработка материалов. – 1984. – № 2. – С. 43–45.
53. Lubicki P., Jayaram S. High voltage pulse application for the destruction of the Gram-negative bacterium *Yersinia enterocolitica* // Bioelectrochem. Bioenergetics. – 1997. – V. 43. – № 1. – P. 135–141.
54. Белошеев, В.П. Исследование лидера искрового разряда по поверхности воды / В.П. Белошеев // Журнал технической физики. – 1998. – Том 68. – № 7. – С. 29–35.
55. Grymonpr D.R., Finney W.C., Locke B.R. Aqueous-phase pulsed streamer corona reactor using suspended activated carbon particles for phenol oxidation: model-data comparison // Chem. Eng. Sci. – 1999. – V. 54 – № 15–16. – P. 3095–3105.
56. Sun B., Sato M., Clements J.S. Use of a pulsed high-voltage discharge for removal of organic compounds in aqueous solution // J. Phys.D: Appl. Phys. – 1999. – V. 32. – № 15. – P. 1908–1915.
57. Anpilov A., Barkhudarov E., Christofi N., Kop'ev V., Kossyi I., Taktakishvili M., Zadiraka Y. Pulsed high voltage electric discharge disinfection of microbially contaminated liquids // Lett. Appl. Microbiol. – 2002. – V. 35. – № 1. – P. 90–94.
58. Ching W. K., Colussi A. J., Hoffmann M.R. Soluble sunscreens fully protect *E-coli* from disinfection by electrohydraulic discharges // Environ. Sci. Technol. – 2003. – V. 37 – № 21. – P. 4901–4904.
59. Sugiarto A.T., Ito S., Ohshima T., Sato M., Skalny J.D. Oxidative decoloration of dyes by pulsed discharge plasma in water // J. Electrostatics – 2003. – V. 58. – № 1–2. – P. 135–145.

60. Chen Y.-S., Zhang X.-S., Dai Y.-C., Yuan W.-K. Pulsed high-voltage discharge plasma for degradation of phenol in aqueous solution // *Separation and Purification Technol.* – 2004. – V. 34. – № 1–3. – P.5–12.

61. Патент 2136600 РФ. МПК C02F 1/46, 7/00. Реактор и способ очистки воды / Боев С.Г., Муратов В.М., Поляков Н.П., Яворовский Н.А.; заявл. 16.12.97; опубл. 10.09.99. Бюл. № 25. – 4 с.: ил.

62. Яворовский, Н.А. Очистка воды с применением электроразрядной обработки / Н.А. Яворовский, В.Д. Соколов, Ю.Л. Сколубович, И.С. Ли // *Водоснабжение и санитарная техника.* – 2000. – № 1. – С. 12–14.

63. Von Gunten U. Ozonation of drinking water: Part I. oxidation kinetics and product formation // *Water Res.* – 2003. – No. 37. – P. 1443–1467.

64. Malik M.A., Gaffar A., Malik S.A. Water purification by electrical discharges // *Plasma sources science & technology.* – 2001. – No. 10. – P. 82–91.

65. Akiyama H. Streamer discharge in liquids and their applications // *IEEE trans on Dielectrics and Electrical Insulation.* – Vol. 7. – No. 5. – October 2000. – P. 646–652.

66. Hickling A. Electrochemical process in glow discharge at the gas-solution interface // *Modern Aspects of Electrochemistry.* – 1971. – P. 329–373.

67. Schoenbach K.H., Joshi R.P., Stark R.H. Bacterial decontamination of liquids with pulsed electric fields // *IEEE Trans, on Dielectrics and Electrical Insulation.* – Vol.7. – No. 5. – 2000. – P. 637–645.

68. Горячев, В.Л. О фотолитических свойствах импульсного разряда в воде / В.Л. Горячев, Ф.Г. Рутберг, А.А. Уфимцев // *Письма в ЖТФ.* – 1998. – Том 24. – № 3. – С. 91–95.

69. Malik M.A., Gaffar A., Malik S.A. Water purification by electrical discharges // *Plasma sources science & technology.* – 2001. – No. 10. – P. 82–91.
Akiyama H. Streamer discharge in liquids and their applications // *IEEE trans on Dielectrics and Electrical Insulation.* – Vol. 7. – No. 5. – October 2000. – P. 646–652.

70. Горячев, В.Л. Электроразрядный метод очистки воды. Состояние, проблемы и перспективы / В.Л. Горячев, Ф.Г. Рутберг, В.Н. Федюкович // Известия академии наук: энергетика. – 1998. – №1. – С. 40–55.

71. Hickling, A. Electrochemical process in glow discharge at the gas-solution interface // Modern Aspects of Electrochemistry. – 1971. – P. 329–373.

72. Mezei P., Cserfalvi T. Electrolyte cathode atmospheric glow discharges for direct solution analysis // Applied spectroscopy reviews. – 2007. – V. 42. – P. 573–604.

73. Akiyama, H. Streamer discharge in liquids and their applications // IEEE trans on Dielectrics and Electrical Insulation. – Vol. 7. – No. 5. – October 2000. – P. 646–652.

74. Зыкина, Л.Н. Обеззараживание речной воды высоковольтными разрядами / Л.Н. Зыкина, В.С. Голдаев // Электронная обработка материалов. – 1974. – № 2. – С. 68–70.

75. Schoenbach K.H., Joshi R.P., Stark R.H. Bacterial decontamination of liquids with pulsed electric fields // IEEE Trans, on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2001. – Vol. 7. – No. 5. – P. 637–645.

76. Кривицкий, Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости / Е.В. Кривицкий. – Киев : Наук. думка, 1986. – 206 с.

77. Гайсин, Ф.М. Объемный самостоятельный разряд в системах с твердыми и жидкими электродами / Ф.М. Гайсин, Э.Е. Сон, Ю.И. Шакиров. – Москва : Изд-во МГУ, 1999. – 76 с.

78. Баринов, Ю.А. Определение концентрации электронов в разряде с жидкими неметаллическими электродами в воздухе при атмосферном давлении по поглощению зондирующего СВЧ-излучения / Ю.А. Баринов, В.Б. Каплан, В.В. Рождественский, В.М. Школьник // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24. – № 23. – С. 52–57.

79. Effects of shock waves, ultraviolet light, and electric fields from pulsed discharges in water on inactivation of Escherichia coli/ BingSun, Yanbin Xina

Xiaomei Zhu, Zhiying Gao, Zhiyu Yan, Takayuki Ohshima // Bioelectrochemistry. – 2018. – V. 120. – P. 112–119.

80. Юткин, Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л.А. Юткин. – Ленинград : Машиностроение, 1986. – 253 с.

81. Бурцев, В.А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В.А. Бурцев, Н.В. Калинин, А.В. Лучинский. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 289 с.

82. Лебедев, С.В. Некоторые аномалии в поведении металлов, нагреваемых импульсами тока большой плотности / С.В. Лебедев, С.Э. Хайкин // ЖЭТФ. – 1954. – Т. 26. – № 5. – С. 629–639.

83. Яворовский, Н.А. Электрический взрыв проводников – метод получения ультрадисперсных порошков: дис. ... к.т.н. – Томск, 1982. – 127 с.

84. Давыдович, В.И. Разработка технологического процесса и оборудования для электровзрывного получения порошков металлов с низкой электропроводностью: дис. ... к.т.н. – Томск, 1986. – 254 с.

85. Лернер, М.И. Управление процессом образования высокодисперсных частиц в условиях электрического взрыва проводников: дис. ... к.т.н. – Томск, 1988. – 155 с.

86. Ляшко, А.П. Особенности взаимодействия с водой и структура субмикронных порошков алюминия: дис... к.х.н. – Томск. 1988. – 178 с.

87. Проскуровская Л.Т. Физико-химические свойства электровзрывных ультрадисперсных порошков алюминия: дис. ... к.х.н. – Томск. 1988. – 155 с.

88. Назаренко, О.Б. Особенности формирования продуктов электрического взрыва проводников в конденсированных средах: дис. ... к.т.н. Томск. 1996. – 129 с.

89. Ильин, А.П. Об избыточной энергии ультрадисперсных порошков, полученных методом взрыва проволок / А.П. Ильин // ФХОМ. – 1994. – № 3. – С. 94–97.

90. Ильин, А.П. Развитие электровзрывной технологии получения нанопорошков в НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете / А.П. Ильин // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 1. – С. 133–139.

91. Ильин, А.П. Диссипация энергии и диспергирование металлов в условиях электрического взрыва проводников / А.П. Ильин, Д.В. Тихонов // Физика и химия обработки материалов. – 2002. – № 6. – С. 60–62.

92. Ильин, А.П. Диссипация энергии и диспергирование металлов в условиях электрического взрыва проводников / А.П. Ильин, Д.В. Тихонов // Физика и химия обработки материалов. – 2002. – № 6. – С. 60–62.

93. Ильин, А.П. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии / А.П. Ильин, А.А. Громов. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2002. – 154 с.

94. Килимник, А.Б. Электрохимический синтез нанодисперсных порошков оксидов металлов : монография / А.Б. Килимник, Е.Ю. Острожкова. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 144 с.

95. Никифорова, Е.Ю. Электрохимическое разрушение никеля в щелочных растворах под действием переменного тока / Е.Ю. Никифорова, А.Б. Килимник // Коррозия: материалы, защита. – 2011. – № 3. – С. 27–31.

96. Патент 158367 U1 Российская Федерация, МПК C02F1/46, C02F1/78. Устройство для очистки воды / Верещагин Н.М., Васильев В.В., Шемарин К.В. № 2014154198/05; заявл. 29.12.2014; опубл. 27.12.2015.

97. Патент 156243 U1 Российская Федерация, МПК C02F1/46. Устройство для очистки загрязненной воды / Богданов П.В., Шутов Д.А., Иванов А.Н. № 2015109420/05; заявл. 17.03.2015; опубл. 10.11.2015.

98. Патент 161968 U1 Российская Федерация, МПК C02F1/46. Устройство обработки жидкостей барьерным разрядом / Якушин Р.В., Чистилинов А.В., Колесников В.А., Бродский В.А. № 2015140261/05; заявл. 22.09.2015; опубл. 20.05.2016.

99. Патент 2 600 641 С9 Российская Федерация, МПК B01D 29/62. Способ очистки жидкости при одновременной очистке фильтроэлемента /

Федотов О.В., Финкильштейн А.М., Финкельштейн Л.З., Пирожник А.А. № 2015142792; заявл. 08.10.2015; опубл. 13.02.2017.

100. Патент 2016 111 797 А Российская Федерация, МПК C02F 9/12, C02F, C02F 1/48, C02F 1/467. Способ очистки и обеззараживания воды / Булат А.Д., Филенков В.М., Обрубов В.А. № 2016111797; заявл. 29.03.2016; опубл. 02.10.2017.

101. Патент 174491 U1 Российская Федерация, МПК C02F1/46, A61L 2/14. Устройство для очистки загрязнённой воды / Богданов П. В., Шутов Д.А., Иванов А.Н. № 2017111307; заявл. 04.04.2017; опубл. 17.10.2017.

102. Патент 185700 U1 Российская Федерация, МПК C02F1/467, C02F 1/48, C02F 1/72, B01J 19/08, A61L 2/03, A61L 2/14. Плазмокаталитический реактор обработки жидкости барьерным разрядом / Якушин Р.В., Чистолинов А.В., Колесников В.А., Перфильева А.В. № 2018134157; заявл. 28.09.2018; опубл. 14.12.2018.

103. Патент 186727 U1 Российская Федерация, МПК C02F1/46, A61L 2/14, H05H 1/00. Устройство плазмодинамической очистки сточных вод / Лазарев В.М. № 2017136325; заявл. 13.10.2017; опубл. 30.01.2019.

104. Патент 188655 U1 Российская Федерация, МПК C02F1/46 Устройство магнитно-плазменной обработки жидкостей / Богданов П.В., Шутов Д.А., Иванов А.Н. № 2018143358; заявл. 07.12.2018; опубл. 18.04.2019.

105. Патент 194143 U1 Российская Федерация, МПК C02F1/34 Устройство для обеззараживания воды / Петров С.В., Дубов О.В., Красницкий И.В., Петров Д.С., Волков М.В., Пелевин П.И. № 2019104594; заявл. 18.02.2019; опубл. 29.11.2019.

106. Патент 2712565 C1 Российская Федерация, МПК C02F, C02F 1/72. Устройство и способ очистки сточных вод от фенола / Шайхитдинов Р. З., Мустафин А.Г., Гатиятуллин Д.Т., Шайхитдинов Т.Р. № 2019122379; заявл. 12.07.2019; опубл. 29.01.2020.

107. Патент 195077 U1 Российская Федерация, МПК C02F 1/467, C02F 1/48. Реактор магнитно-плазменной обработки жидкостей / Якушин Р.В.,

Чистилин А.В., Колесников В.А., Перфильева А.В. № 2019129306; заявл. 18.09.2019; опубл. 14.01.2020.

108. Патент 2769109С1 Российская Федерация, МПК C02F, C02F 1/72. Способ гидродинамической очистки воды и устройство для гидродинамической очистки воды / Бобылёв Ю.О. № 2021125130; заявл. 25.08.2021; опубл. 28.03.2022.

109. Белкин, В.С. Наносекундные электромагнитные импульсы и их применение / В.С. Белкин, В.А. Бухарин, В.К. Дубровин и др. / под ред. В.В. Крымского. – Челябинск: Изд-во «Татьяна Лурье», 2001. – 119 с.

110. Крымский, В.В. Теоретические и экспериментальные исследования излучателей несинусоидальных волн: дис. ... д.ф.-м.н. – Челябинск, 1993. – 283 с.

111. Крымский, В.В. Воздействие наносекундных электромагнитных импульсов на свойства веществ / В.В. Крымский, В.Ф. Балакирев // Доклады РАН. – 2002. – Т. 385. – № 6. – С. 786–787.

112. Harmuth, H.F. Nonsinusoidal waves for radar and radio communication. – New York : Academic Press, 1981. – 396 p.

113. Крымский, В.В. Теория несинусоидальных электромагнитных волн / В.В. Крымский, В.А. Бухарин, В.И. Заляпин. – Челябинск : ЧГТУ, 1996. – 128 с.

114. Бухарин, В.А. Расчет импульсного электромагнитного поля в проводящей среде / В.А. Бухарин, В.В. Крымский, А.Ю. Усков, Н.А. Шабурова // Вестник ЮУрГУ. – Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 26–28.

115. Грехов, И.В. Формирование высоковольтных наносекундных перепадов напряжения на полупроводниковых диодах с дрейфовым механизмом восстановления напряжения / И.В. Грехов, В.М. Ефанов, А.Ф. Кардо-Сысоев, С.В. Шендерей // Письма в ЖТФ. – 1983. – Т. 9. № 7. – С. 435.

116. Грехов, И.В. Мощный полупроводниковый генератор пикосекундных импульсов / И.В. Грехов, В.М. Ефанов, А.Ф. Кардо-Сысоев, С.В. Шендерей // ПТЭ. – 1984. – № 5. – С. 103–106.

117. Белкин, В.С. Формирователи высоковольтных пикосекундных импульсов / В.С. Белкин, Г.И. Шульженко // ПТЭ. – 1992. – № 6. – С. 125–126.

118. Белкин, В.С. Формирователи мощных наносекундных импульсов на полупроводниковой элементной базе: дис. ... к.т.н.– Новосибирск : ИЯФ им. Будкера, 1993. – 180 с.

119. Ри, Э.Х. Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами на ее строение, процессы кристаллизации, структурообразование и свойства литейных сплавов / Э.Х. Ри, Хосен Ри, С.В. Дорофеев, В.И. Якимов. – Владивосток : Дальнаука, 2008. – 177 с.

120. Крымский, В.В. Антенны несинусоидальных волн / В.В. Крымский. – Челябинск : Изд-во ЦНТИ, 2004. – 133 с.

121. Исследование влияния мощных наносекундных электромагнитных импульсов на химические свойства веществ и биологические объекты: отчет о НИР, гос. рег. № 01.96.0009487, инв. № 02.97.0001651. – Челябинск : ЧГТУ, 1996.

122. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Измеритель неоднородности линий Р5-15.

123. Гришин, Д.Г. Электроимпульсная активация воды / Д.Г. Гришин, В.В. Крымский // Инжиниринг, инновации, инвестиции. – 2005. – Вып.7. – С. 106–109.

124. Антошкина, Е.Г. Электроимпульсная активация водных растворов солей / Е.Г. Антошкина, К.В. Белиоглов, Д.Г. Гришин, В.В. Крымский В.В // Интеллектика, логистика, системология. – 2005. – Вып. 17. – С. 82–87.

125. Знаменский, Л.Г. Явление увеличения скорости электродиализа коллоидных растворов при воздействии на них наносекундных электромагнитных импульсов / Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина, В.В.

Крымский, Б.А. Кулаков. Диплом № 293 Международной академии авторов научных открытий и изобретений // Научные открытия, идеи, гипотезы. – Инф.-аналитический обзор. – Москва : МААНОИ, 2008. – 428 с.

126. Юткин, Л.А. Электрогидравлический эффект / Л.А. Юткин. – Москва; Ленинград : Машгиз, 1955. – 52 с.

127. Патент РФ 2176558 С1 Российская Федерация, МПК В03В 7/00. Способ переработки материалов, содержащих благородные металлы / Бунин И.Ж., Вдовин В.А., Гуляев Ю.В., Корженевский А.В., Лунин В.Д., Чантурия В.А., Черепенин В.А. № 2000132156/03; заявл. 22.12.2000; опубл. 10.12.2001.

128. Патент 2383391 С1 Российская Федерация, МПК В03В 7/00, В02С 19/18. Устройство для переработки материалов, содержащих благородные металлы / Гуляев Ю.В., Бугаев А.С., Вдовин В.А., Масленников О.Ю., Черепенин В.А. № 2008150605/03; заявл. 22.12.2008; опубл. 10.12.2010.

129. Патент 2391418 С1 Российская Федерация, МПК С22В 3/04, С22В 3/02. Способ извлечения металлов из руд и устройство для его осуществления / Знаменский Н.В., Петренко В.В., Арефьев А.В., Алексеев П.А. № 2009123224/02; заявл. 18.06.2009; опубл. 10.06.2010.

130. Патент 2453697 С1 Российская Федерация, МПК Е21В 43/28. Способ кучного выщелачивания окисленных и смешанных медно-цинковых руд / Чантурия В.А., Чантурия Е.Л., Миненко В.Г., Самусев А.Л., Каплин А.И. № 2010147041/03; заявл. 18.11.2010; опубл. 20.06.2012.

131. Патент 152661 U1 Российская Федерация, МПК Н05В 6/64. СВЧ-установка для дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов / Морозов О.А., Требух В.П., Прокопенко А.В., Гусейнов Муфаги Амир Оглы № 2014149022/07; заявл. 05.12.2014; опубл. 10.06.2015.

132. Патент 2585293 С1 Российская Федерация, МПК Е21В 43/28, Е21F 15/00, В03В 9/00. Способ комбинированной разработки руд / Лизункин В.М., Гурулев А.Л., Лаевский Д.Н., Бейдин А.В., Морозов А.А. № 2015103584/03; заявл. 03.02.2015; опубл. 27.05.2016.

133. Патент 2585593 С1 Российская Федерация, МПК С22В 11/00, С22В 7/00, С22В 3/04. Способ кучного выщелачивания золота из упорных руд и техногенного минерального сырья / Секисов А.Г., Мязин В.П., Лавров А.Ю., Попова Г.Ю., Конарева Т.Г. № 2015102678/02; заявл. 27.01.2015; опубл. 27.05.2016.

134. Патент 2648400 С1 Российская Федерация, МПК В03D 1/02. Способ извлечения ультрадисперсных частиц золота из упорных углеродистых руд / Афанасова А.В., Александрова Т.Н. № 2017109642; заявл. 22.03.2017; опубл. 26.03.2018.

135. Патент 2689487 С1 Российская Федерация, МПК С22В 11/00, С22В 3/04. Способ извлечения благородных металлов из руд и концентратов / Секисов А.Г., Хрунина Н.П., Прохоров К.В., Рассказова А.В. № 2018134376; заявл. 28.09.2018; опубл. 28.05.2019.

136. Патент 2711428 С2 Российская Федерация, МПК В02С 19/18. Способ селективного управления свойствами руд благородных металлов / Ананьев П.П., Плотникова А.В., Ларионов П.В., Мещеряков Р.В., Беляков К.О. № 2018123808; заявл. 29.06.2018; опубл. 17.01.2020.

137. Патент 2739234 С1 Российская Федерация, МПК В02С 19/18. Способ электромагнитной рудоподготовки и устройство для его осуществления / Ананьев П.П., Плотникова А.В., Мещеряков Р.В., Беляков К.О., Адамян Э.В. № 2019144390; заявл. 27.12.2019; опубл. 22.12.2020.

138. Патент 2773491 С1 Российская Федерация, МПК В03В 7/00. Способ обогащения железных руд / Кусков В.Б., Львов В.В. № 2021134144; заявл. 23.11.2021; опубл. 06.06.2022.

139. Hart, E.J. The Hydrated Electron / E. J. Hart and M. Anbar. – New York: Wiley Inter Science, 1970. – 280 p.

140. Augustine, O. Allen The Radiation Chemistry of Water and Aqueous Solutions / Augustine O. Allen. – Van Nostrand, 1961. – 204 p.

141. Пикаев, А.К. Импульсный радиолиз воды и водных растворов / А.К. Пикаев. – Москва : Наука, 1965. – 260 с.

142. Пикаев, А.К. Сольватированный электрон в радиационной химии / А.К. Пикаев. – Москва : Наука, 1969. – 200 с.

143. Пикаев, А.К. Современная радиационная химия / А.К. Пикаев. – Москва : Наука, 1985. – 373 с.

144. Пикаев, А.К. Современная радиационная химия. Радиолиз газов и жидкостей / А.К. Пикаев. – Москва : Наука, 1986. – 305 с.

145. Чантурия, В.А. Электрохимия сульфидов. Теория и практика флотации / В.А. Чантурия. – Москва : Наука, 1993.

146. Чантурия, В.А. Вскрытие упорных золотосодержащих руд при воздействии мощных электромагнитных импульсов / В.А. Чантурия, Ю.В. Гуляев, В.Д. Лунин, И.Ж. Бунин, В.А. Чепенин, В.А. Вдовин, А.В. Корженевский // Доклады Академии наук. – 1999. – Т. 366. – № 5. – С. 680–683.

147. Чантурия, В.А. Влияние кислотной и электрохимической обработки минеральных суспензий на физико-химические и электрические свойства танталита, колумбита, циркона и полевого шпата / В.А. Чантурия, Е.Л. Чантурия, И.Ж. Бунин, М.В. Рязанцева, Е.В. Копорулина, А.Л. Самусев, Н.Е. Анашкина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 4. – С. 142–157.

148. Усов, А.Ф. Опыт разработки средств электроимпульсной дезинтеграции материалов / А.Ф. Усов, В.А. Цукерман, В.И. Курец // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – С. 310–318.

149. Бунин, И.Ж. Экспериментальное исследование нетеплового воздействия мощных электромагнитных импульсов на упорное золотосодержащее сырье / И.Ж. Бунин, Н.С. Бунина, В.А. Вдовин и др. // Изв. АН. Сер. Физическая. – 2001. – Т. 65. – № 12. – С. 1788–1792.

150. Чантурия, В.А. Роль истечения газа из каналов наносекундного пробоя в процессе электроимпульсной дезинтеграции сульфидных минералов

/ В.А. Чантурия, И.Ж. Бунин, А.Т. Ковалев // Изв. РАН. Сер. Физическая. – 2010. – Т. 74. – № 5. – С. 714–717.

151. Чантурия, В.А. О процессах формирования микро- и наночастиц на поверхности сульфидных минералов при воздействии наносекундных электромагнитных импульсов / В.А. Чантурия, И.Ж. Бунин, А.Т. Ковалев, Е.В. Копорулина // Изв. РАН. Сер. Физическая. – 2012. – Т. 76. – № 7. – С. 846–850.

152. Бунин, И.Ж. Мощные наносекундные электромагнитные импульсы и их применение в процессах дезинтеграции минеральных комплексов / И.Ж. Бунин // ГИАБ. – 2008. – № 2.

153. Литвинова, Е.В. Повышение коррозионной стойкости автоклавов, применяемых для гидротермального синтеза кварца: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Литвинова Екатерина Валерьевна. – Челябинск, 2002. – 103 с.

154. Бунин, И.Ж. Теоретические основы воздействия наносекундных электромагнитных импульсов на процессы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов и извлечения благородных металлов из руд: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Бунин Игорь Жанович. – Москва, 2009. – 324 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

Акт внедрения результатов диссертационной работы в АО НПФ
«Башкирская золотодобывающая компания»

УТВЕРЖДАЮ

Ген. директор АО НПФ «Башкирская
золотодобывающая компания»

 Гизатуллин И.С.

«__» _____ 2019г.

АКТ

Внедрения результатов диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата технических наук Мингажевой Юлии Газинуровны на тему «Изменение свойств водных сред при обработке высоковольтными наносекундными электромагнитными импульсами» используются при разработке и внедрении новых методов выпщелачивания благородных металлов из упорных сульфидных руд.

Главный технолог





Мухаметшин И.Х.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (справочное)

Акт внедрения результатов диссертационной работы в ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

пл. Соляная, 2, г. Томск, 634003, телефон [3822] 65-32-61, факс [3822] 65-24-22, e-mail: can@tsuab.ru
ОКПО 02069295690001, ОГРН 1027000882888 ИНН/КПП 7020000080/701701001

25.06.2024 № 1402-05
На _____ № _____

В диссертационный совет
ДС.ТПУ.19 при федеральном
государственном автономном
образовательном учреждении
высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационного исследования
Мингажевой Юлии Газинуровны
«Изменение свойств водных сред при обработке высоковольтными наносекундными
электромагнитными импульсами»

ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» подтверждает, что предложенный Мингажевой Юлией Газинуровной с помощью метода активации водной среды высоковольтными наносекундными электромагнитными импульсами можно использовать в очищении от металлов питьевые и сточные воды, синтезе нанопорошков железа, а также в обработке золотосодержащей пульпы, с целью увеличения извлечения благородных металлов из упорных сульфидных руд. Представленная в диссертационном исследовании лабораторная установка, используется в качестве практического материала в ходе подготовки курсов «Процессы и аппараты защиты окружающей среды», «Инженерная геология», «Источники загрязнения и охрана окружающей среды», а также при подготовке бакалавров по направлению «Безопасность технологических процессов и производств», «Инженерная защита окружающей среды».

Тема диссертационного исследования отражает важные проблемы активации воды, в целях решения конкретных задач по очистке воды и получения разных веществ после электронимпульсной обработки и является актуальной. Диссертация выполнена на высоком уровне, а результаты данного исследования представляют определенный научный интерес.

Ректор



В.А. Власов