

**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**



На правах рукописи



Мингажева Юлия Газинуровна

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

2.4.4 – Электротехнология и электрофизика

Томск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (ФГБОУ ВО ТГАСУ) и Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель:

Волокитин Олег Геннадьевич

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры прикладной механики и
материаловедения Томского государственного
архитектурно-строительного университета

Научный консультант

Пак Александр Яковлевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией перспективных
материалов энергетической отрасли Инженерной
школы энергетики Томского политехнического
университета

Официальные оппоненты:

Рыжков Сергей Витальевич

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры теплофизики Московского
государственного технического университета
имени Н.Э. Баумана

Королёв Юрий Дмитриевич

доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник Лаборатории
низкотемпературной плазмы Института
сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук

Защита состоится «21» января 2025 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета ДС. ТПУ. 19 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 года

Ученый секретарь

диссертационного совета

ДС.ТПУ.19

к. т. н., доцент

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized, cursive 'S' shape, positioned over a horizontal line.

Ивашутенко
Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Научная область, к которой относятся материалы, изложенные в диссертационной работе, – исследование электроимпульсного воздействия на водную среду. Работа посвящена исследованию изменения свойств водных сред при обработке маломощным генератором наносекундных электромагнитных импульсов.

Актуальность темы исследования

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. К этой же области можно отнести электроимпульсную обработку золотосодержащих руд в водной среде. 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 обработки золотосодержащих 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).

Степень разработанности темы исследований

Возможность применения электрического разряда для дробления горных пород впервые представлена в работе Л.А. Юткина. Электрогидравлический эффект Юткина начал использоваться в различных областях производства: в машиностроительной, металлургической, горно-геологоразведочной, нефтяной и др. Мощный импульс развития использования электрических разрядов в жидких

диэлектриках последовал в области технологии дробления и бурения горных пород после открытия в 1960-е гг. «эффекта Воробьевых». Эффект заключался во внедрении разряда в тело твердого диэлектрика, помещенного в жидкий диэлектрик при приложении высоковольтного импульса с определенным (крутым) фронтом. Была выявлена закономерность: чем больше крутизна нарастающего фронта напряжения, тем больше импульс будет стремиться вглубь твердого диэлектрика, помещенного в жидкий диэлектрик. Последователями А.А. и Г.А. Воробьевых стали И.И. Каляцкий, Б.В. Сёмкин, А.Ф. Усов, В.И. Курец, В.Т. Казуб, Г.С. Коршунов, В.Я. Ушаков, Н.Ф. Побежимов, С.Я. Рябчиков, В.Ф. Важев, Н.Т. Зиновьев и др.

Электроимпульсные технологии развивались не только для применения в различных областях производства, но и в радиолокации. До 1980-х гг. в радиолокации использовались только синусоидальные волны, но в 1981 г. Harmuth Н.Ф. первым предложил использовать последовательности прямоугольных импульсов. В своей работе «Nonsinusoidal waves for radar and radio communication» им была сформулирована основная теория и 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.

В 1990 г. в Челябинском политехническом институте при выполнении НИР «Специальный измерительный стенд» был разработан и изготовлен генератор наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ) для радиолокации. Основным преимуществом генератора НЭМИ является малая потребляемая мощность от сети – менее 50 Вт. При амплитуде напряжения 15 кВ и нагрузки 50 Ом: импульсный ток – 300 А, мощность одного импульса – 4,5 МВт, средняя мощность $P_{\text{ср}} = 4,5$ Вт. Тогда энергия одного импульса – 4,5 мДж, поэтому при обработке НЭМИ увеличение температуры обрабатываемого вещества не наблюдается.

В 1996 г. В.В. Крымский предложил метод воздействия НЭМИ на воду и на различные вещества в водной среде. Главное преимущество этого метода состоит в том, что использование импульсов длительностью порядка 1 нс позволяет получить большую энергию в импульсе, более тонкое воздействие на обрабатываемое вещество, из-за чего не наблюдается перегрев, разрушение электродной системы и не происходит видимый электрический разряд. Оценка действия импульсного поля на свойства веществ носит экспериментальный подход, т. к. невозможно строго задать распределения сторонних токов $j^{\text{ст}}$ и сложности решения восьмимерного уравнения. Работы по нетрадиционным методам дезинтеграции и вскрытия золотосодержащих руд, в частности применением мощных импульсов, продолжались и в Институте проблем комплексного освоения недр РАН. В начале 2000-х гг. у В.А. Чантурии вышла работа «Вскрытие упорных золотосодержащих руд при воздействии мощных

электромагнитных импульсов». Исследования в данной области получили дальнейшее развитие. 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.И. Курец, В.Ю. Иванов, А.С. Самерханова, Г.В. Седельникова, Г.С. Крылова и др. Несмотря на большое количество испытаний и исследований в области электроимпульсного воздействия в различных областях, изучение и исследование изменения свойств веществ при обработке высоковольтными НЭМИ является актуальным.

Целью диссертационной работы является разработка технологии и устройства для воздействия высоковольтными НЭМИ на водную среду с целью изменения её свойств.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

1. Анализ литературных источников и патентный поиск работ по проблемам магнитной, ультразвуковой, электроимпульсной обработки 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.

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 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.
4. При обработке НЭМИ модельного раствора, содержащего соли NiSO_4 и

CuSO₄ концентрацией 5 г/л, получены:

- рентгеноаморфный оксигидроксид железа FeOОН 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.

5. 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 BiCl₃.

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 вод 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 комплексном подходе, включающем экспериментальное исследование воздействия НЭМИ на водную среду и сравнение исходного и обработанного образцов.

В качестве источников импульсов высокого напряжения был использован генератор НЭМИ ЗАО «НПАО ФИД-ТЕХНОЛОГИЯ» и GPN Института ядерной физики РАН. Для измерения электрических характеристик электродной системы были использованы методы импульсной рефлектометрии с помощью 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», для определения морфологических особенностей образовавшихся соединений до и после обработки НЭМИ – электронный микроскоп 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 комплекс 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 результатов 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 конференция «Пром-Инжиниринг-2016» (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 результатам исследований по теме диссертации опубликовано 4 статьи в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, 4 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК, и 10 в сборниках материалов конференций, получены 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 заключается в анализе литературных данных, планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе интерпретации полученных данных, формулировании выводов, а также в подготовке научных публикаций.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, цитируемой литературы (154 наименований) и приложения. Содержит 145 страниц основного текста, в том числе 41 рисунок и 40 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, показана степень разработанности темы, определены цель исследований и задачи, решение которых необходимо для её достижения, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту, представлены степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе выполнен обзор научно-технической литературы, посвященной изменению свойств водных растворов при обработке электрохимическим, электромагнитным, электроимпульсным способами. Приведен патентный поиск электроимпульсной технологии по воздействию на водную среду за последние 8 лет. В конце первой главы приведен относительно новый способ воздействия на воду наносекундными электромагнитными импульсами.

Во второй главе приведено описание методики и средств эксперимента. В качестве образцов для обработки НЭМИ были взяты:

- дистиллированная вода;
- питьевая вода (Учалинская, Карамовского месторождения (ЯНАО), Челябинская);
- сточная вода на входе и выходе очистных сооружений Учалинского горно-обогатительного комбината (УГОК);
- модельный раствор с высокой концентрацией меди и никеля;
- пульпа из золотосодержащей руды и дистиллированной воды или цианида натрия.

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

В настоящей работе был использован излучатель-электрод, который представляет из себя круглый стержень из меди, графита, стали или стержень с серебряным покрытием (рисунок 1). Излучатель-электрод погружается в проводящую ёмкость из нержавеющей стали (марка 08X18H10, диаметр – 95 мм, высота – 110 мм) или в стеклянную колбу в экране из медной фольги (диаметр колбы – 80 мм, высота – 150 мм). Пусковой излучатель-электрод соединяется с выводом центральной жилы кабеля, оплетка кабеля соединяется с заземленным излучателем-электродом: экраном или ёмкостью, если он изготовлен из металла. Диаметры стержня и ёмкости должны находиться в определенной пропорции, которая зависит от свойств обрабатываемой воды. Получаем электродную систему (ЭС), подобную коаксиальной линии.

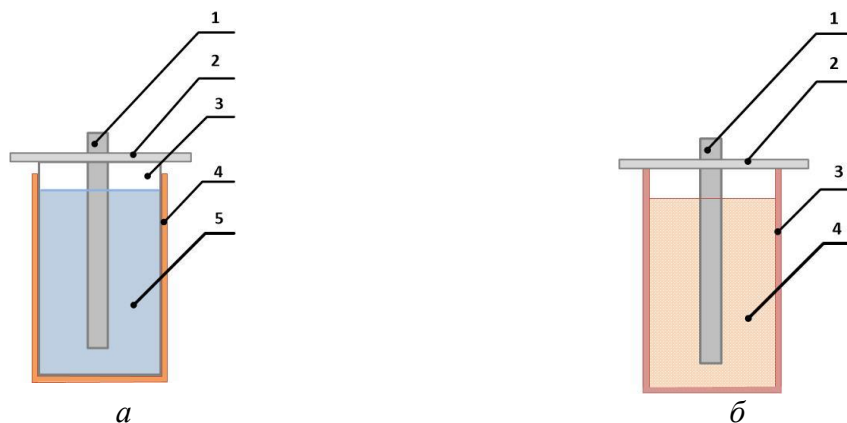


Рисунок 1 – Электродная система: *а* – ЭС «излучатель-электрод в стеклянной колбе»: 1 – пусковой излучатель-электрод; 2 – фиксатор; 3 – колба из химически стойкого стекла; 4 – медная фольга – заземленный излучатель-электрод; 5 – обрабатываемый раствор; *б* – ЭС «излучатель-электрод в проводящей ёмкости»: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

Для обработки большого объема жидкости используется установка проточного типа (рисунок 2). Основные технические характеристики установки приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические характеристики установки проточного типа

Тип исследуемой жидкости	Вода, растворы солей
Максимальная температура жидкости, °С	50
Диапазон изменения массового расхода жидкости, л/мин	0...6
Максимальное давление подачи жидкости, МПа	0,3
Максимальный объем жидкости в расходном баке, л	40
Максимальная потребляемая электрическая мощность, кВт	0,5



Рисунок 2 – Фотография установки проточного типа

Вторая ЭС была сделана для обработки пульпы из золотосодержащей

руды в виде прямоугольной ёмкости из стали и верхней съемной пластины на диэлектрических бочонках (рисунок 3). Ёмкость представляет собой заземленный излучатель-электрод, который подключается к оплётке кабеля от генератора импульсов, а съемная пластина (пусковой излучатель-электрод) – к центральной жиле кабеля.

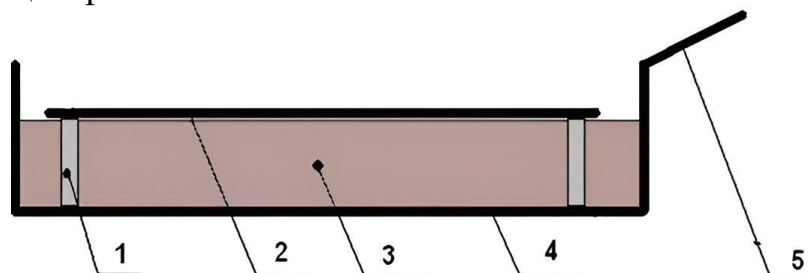


Рисунок 3 – ЭС для обработки пульпы из золотосодержащей руды: 1 – диэлектрический бочонок; 2 – пусковой излучатель-электрод; 3 – обрабатываемая пульпа; 4 – заземленный излучатель-электрод; 5 – загрузочный узел

Основными характеристиками ЭС являются электрические и пространственные. Важным энергетическим показателем является согласованность генератора импульсов и ЭС. По этому показателю можно судить, сколько энергии подводится к обрабатываемой среде от генератора. Для измерения электрических характеристик ЭС был использован малогабаритный импульсный рефлектометр пикосекундного диапазона – измеритель неоднородности линий Р5-15.

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. В таблице 2 представлены снятые показатели и рассчитанные электрические характеристики ЭС.

Таблица 2 – 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_l – продольное сопротивление, Ом	15,63	13,73	13,73	15,63

По результатам проделанных опытов сделаны 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.

В данной работе использовались генераторы:

– генератор фирмы ЗАО «НПАО ФИД-ТЕХНОЛОГИЯ» с параметрами: регулируемая амплитуда – 7–15 кВ, регулируемая частота повторения – 100–1000 Гц, длительность импульса – 0,6 нс, длительность переднего фронта – 0,15 нс;

– генератор GPN Института ядерной физики РАН с параметрами: амплитуда напряжения – 5 кВ, длительность импульса – 1 нс, фронт – 0,1 нс, частота – 1 кГц.

Форма импульсов треугольная, полярность положительная. Принципиальная схема генератора приведена на рисунке 4. Основное преимущество генератора НЭМИ – это малая потребляемая мощность от сети. Генератор, использованный в данной работе, потребляет от сети менее 50 Вт, несмотря на большие значения импульсной мощности.

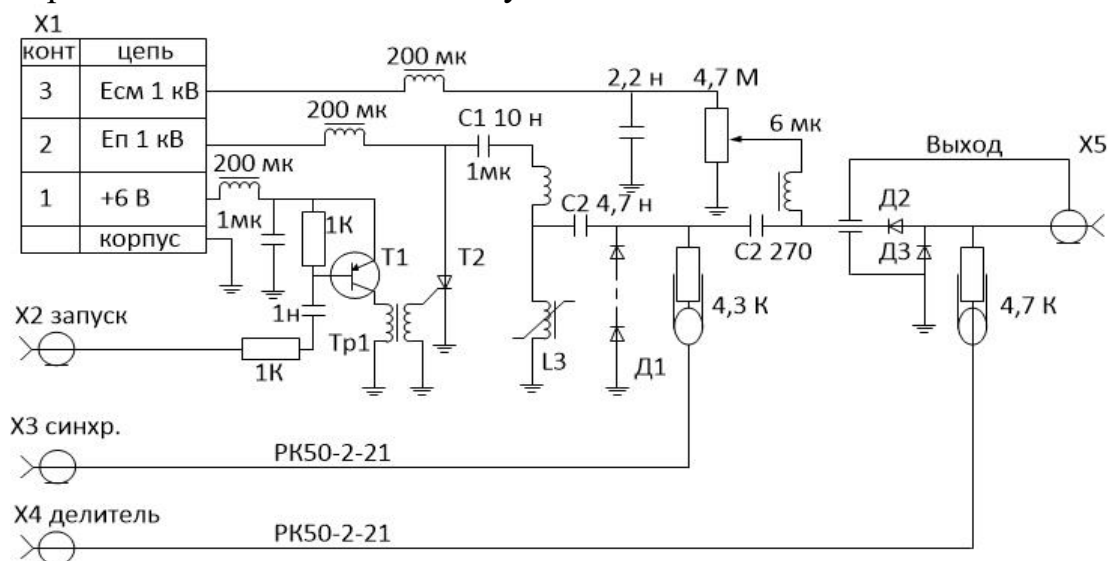


Рисунок 4 – Принципиальная схема генератора НЭМИ

Реальный импульс генератора представлен на рисунке 5. 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.

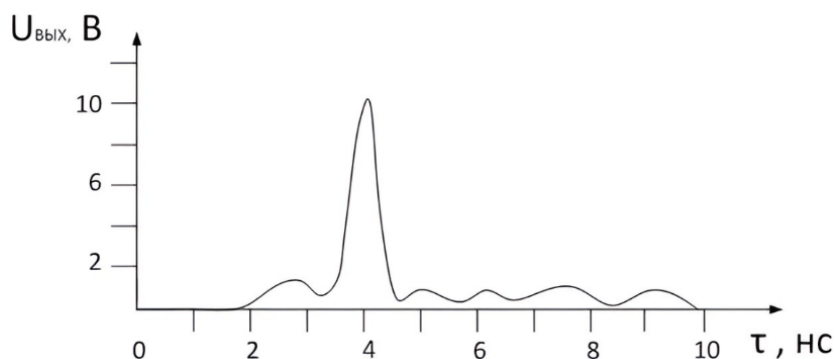


Рисунок 5 – Осциллограмма импульса генератора НЭМИ

В работах В.В. Крымского выявлены граничные условия применения 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.

В третьей главе приведены результаты воздействия НЭМИ на водную среду с разной концентрацией ионов металлов.

В первой части третьей главы приведены первые результаты исследования воздействия НЭМИ на воду. После обработки НЭМИ увеличение рН бидистиллята наблюдается только после 400 с обработки, после 20 мин увеличивается диэлектрическая проницаемость на 7,8–8,1 %; повышается рН на 0,1–0,15 ед. Экспериментально показано, что дальнейшее увеличение времени обработки не влияет на диэлектрическую проницаемость. Поэтому в дальнейших работах обработка НЭМИ в 20 мин является граничным показателем.

Далее приведен эксперимент по сравнению воздействия НЭМИ с воздействием электролиза. Сделан вывод, что обработка дистиллированной воды НЭМИ приводит: к увеличению рН и ϵ , уменьшению удельного сопротивления более чем в 2 раза.

Во второй части третьей главы приведены результаты обработки НЭМИ питьевой воды из разных источников. После обработки НЭМИ питьевой воды наблюдается заметное уменьшение содержания железа – на 41 %, уменьшение меди и марганца – в пределах погрешности. При обработке воды с $pH = 6,5$ из скважины Карамовского месторождения ЯНАО наблюдается снижение содержания железа на 10 %. При обработке воды с $pH = 2,2$ из той же скважины содержание железа снизилось на 30 %.

Далее приводятся результаты обработки воды из рабочей скважины 78-64а пос. Смолино (Челябинская обл.). После обработки НЭМИ наблюдается уменьшение содержания алюминия, железа и меди. Далее приведены результаты опытов по воздействию НЭМИ на бактериальные культуры. После обработки НЭМИ уменьшается жизнестойкость бактерий кишечной палочки и дизентерии, а жизнестойкость штаммов стафилококка и сальмонеллеза не изменяется. По положительным результатам представленных опытов сделан вывод: эффект воздействия НЭМИ можно использовать в очистке питьевой воды от железа, меди, алюминия и от некоторых бактерий.

В третьей части третьей главы приведены результаты воздействия НЭМИ на сточные воды на выходе и входе очистных сооружений «Участок нейтрализации» УГОК. Сделаны следующие выводы: после обработки НЭМИ сточной воды наблюдается уменьшение содержания металлов в обработанной отфильтрованной пробе воды: Fe, Cu, Zn, Mn.

В четвертой части третьей главы приведены результаты опытов по обработке НЭМИ модельных растворов с высокой концентрацией ионов металлов. Модельный раствор был приготовлен из дистиллированной воды и солей $CuSO_4$, $NiSO_4$ концентрацией 5 г/л. На рисунке 6 представлена экспериментальная установка для обработки модельных растворов.

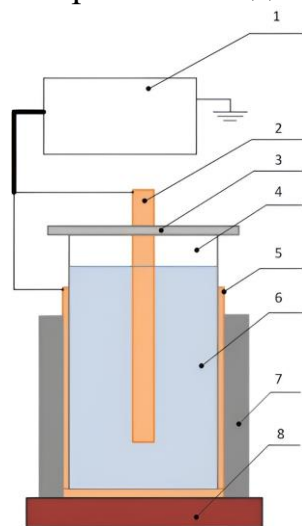


Рисунок 6 – Экспериментальная установка: 1 – генератор НЭМИ; 2 – пусковой излучатель-электрод; 3 – фиксатор; 4 – колба; 5 – экран из медной фольги – заземленный излучатель-электрод; 6 – обрабатываемый раствор; 7 – теплоизолятор; 8 – электрическая печь

После обработки НЭМИ модельного раствора заметили:

1. В осадке без обработки обнаружены кристаллы меди двух видов: чистая медь (рисунок 7, а, таблица 3) и дендриты меди (рисунок 7, б). Наноразмерных конгломератов железа не обнаружено.

2. В осадке после обработки обнаружен рентгеноаморфный оксигидроксид железа FeOОН размером 30–50 нм (рисунок 7, в, таблица 3). Поэтому можем сделать вывод о влиянии воздействия НЭМИ на образование наноразмерных конгломератов железа.

3. На пробе «Электрод без обработки» замечены наросты кристаллов меди (рисунок 7, г).

4. На пробе «Электрод после обработки» наблюдаются «скелетные кристаллы» меди правильной формы (рисунок 7, д, е, таблица 3). В результате можем предположить влияние воздействия НЭМИ на пространственное построение соединений химических элементов, в частности на кристаллы меди.

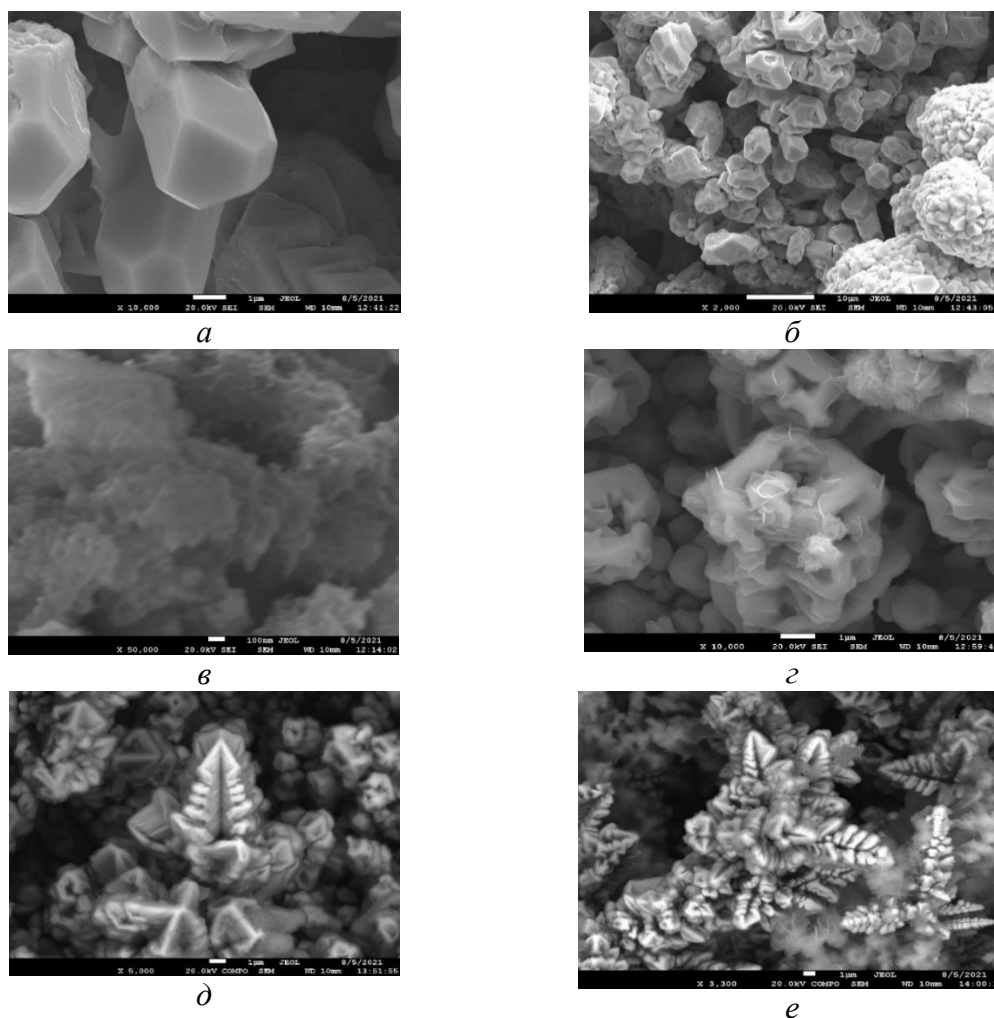


Рисунок 7 – Электронные микрофотографии осадка и кристаллов на электроде

Таблица 3 – Массовое содержание элементов в пробах, %

Химический элемент	O	Al	S	Fe	Ni	Cu	Sn	Итого
«Осадок без обработки»	5,48	0,28	0,02	0,12	0,00	94,10	0,00	100,00
«Осадок после обработки»	51,91	1,21	6,18	28,33	3,60	8,24	0,53	100,00
«Электрод после обработки»	18,17	0,10	2,47	8,86	4,05	66,36	0,00	100,00

По результатам проведенных экспериментов сделаны 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. 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 называемых скелетных кристаллов. Можем сделать вывод, что воздействие НЭМИ влияет на пространственное построение соединения химических элементов.

3. О влиянии НЭМИ на образование новых соединений очень малых размеров свидетельствует тот факт, что после обработки модельного раствора наблюдается выпадение осадка из конгломератов железа порядка 30–90 нм, который в 10 раз меньше, чем результат без обработки.

В пятой части третьей главы приведены результаты исследования воздействия НЭМИ на модельные растворы с содержанием железа, меди и цинка. Для этого в первой серии опытов приготовили раствор из дистиллированной воды и солей FeSO_4 , CuSO_4 с концентрациями 0,1; 1; 20 мг/л. 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. Время обработки – 10 и 20 мин.

Из проведенных опытов сделаны следующие 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.

В четвертой главе представлены результаты исследования воздействия НЭМИ на пульпу из золотосодержащей руды карьера АО НПФ «Башкирский золотодобывающий комбинат» (АО НПФ «БЗК»). Пульпу получали из руды и дистиллированной воды. Пробы для выявления содержания металлов брали через 1, 3, 6, 12 ч после выдержки пульпы в цианиде. По результатам проведенных экспериментов сделаны следующие выводы:

1. Через 12 ч после выдержки пульпы в цианиде наблюдается приrost извлечения:

– 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.

2. 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 % и цинка – 4,22 %.

3. 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 %.

4. 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.

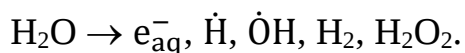
В пятой части четвертой главы приведена разработанная лабораторная установка УНИОЗР-01 (установка для наносекундной обработки золотосодержащих руд) и в конце главы даны выводы после её испытания. Основной принцип работы установки УНИОЗР-01 заключается в обработке пульпы из золотосодержащей руды в водном пространстве между электродами из стальных пластин. Конструкция установки представлена на рисунке 3.

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. Далее приведен патентный поиск последних 10 лет, который демонстрирует активное использование и развитие электроимпульсной технологии для извлечения цветных и драгоценных металлов из упорных руд.

В пятой главе приведено обобщение и оценка результатов исследований. При разработке теоретических положений воздействия НЭМИ на водные растворы и золотосодержащую руду исходили из двух подходов. Первый подход связан с изменением свойств воды под действием электронных пучков, который называют радиолизом воды. Второй подход связан со вскрытием минеральных комплексов и их разрушением под воздействием НЭМИ на золотосодержащую пульпу.

В первой части пятой главы полученные результаты воздействия НЭМИ на водную среду сравнены с эффектом радиолиза водной среды с возникновением гидратированных электронов. Кратко процесс радиолиза

воды можно выразить схемой:



Гидратированный электрон является одним из главных продуктов радиолиза воды и водных растворов. В работах Е.Л. Hart и М. Anbar экспериментально был установлен окислительно-восстановительный потенциал, составляющий $-2,7$. Отсюда следует, что гидратированный электрон является самым простым и эффективным восстановителем, соответственно, в процессе радиолиза он играет ключевую роль, реагируя большинством продуктов радиолиза.

У этих же авторов сделаны выводы: двухвалентные ионы переходной группы Cr(II), Mn(II), Fe(II), Co(II), Ni(II), Cu(II) реагируют с e_{aq}^- 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.

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. Подтверждение было выявлено в образце после обработки сточной воды Учалинского ГОК наносекундными электромагнитными импульсами, уменьшение сульфатов не наблюдается.

Далее приведены таблицы оценки степени воздействия НЭМИ на снижение содержания примесей в воде до значения ПДК. По проведенным экспериментам сделаны выводы:

1. При обработке НЭМИ артезианской воды, питьевой воды ($\text{pH} = 3,5$) из скважины Карамовского месторождения ЯНАО, питьевой воды из рабочей скважины 78–64а пос. Смолино (Челябинская обл.) уменьшается концентрация металлов до ПДК, а для очистки питьевой воды ($\text{pH} = 2,2$) Карамовского месторождения ЯНАО необходимы дополнительные методы очистки.

2. Обработка НЭМИ сточной воды уменьшает концентрацию алюминия, железа и меди до показателей ПДК, но для очистки от сульфатов необходимы дополнительные способы очистки.

Во второй части пятой главы представлена теоретическая модель воздействия электромагнитных импульсов на руду. Имеет место эффект электрического пробоя руды, после чего происходит вскрытие минеральных

комплексов и их разрушение. Основная идея состоит в том, что на поверхности минерала за счет конденсации паров металлов и серы образуются новые нанофазы оксидов железа, меди или других металлов.

Была проведена серия исследований по обработке золотосодержащей пульпы. 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 %. Также было выявлено благотворное влияние добавления солей NaCl , BiCl_3 на увеличение выхода серебра, золота и меди в раствор.

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 8).

В таблице 4 приведен экономический эффект установки при условии:

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

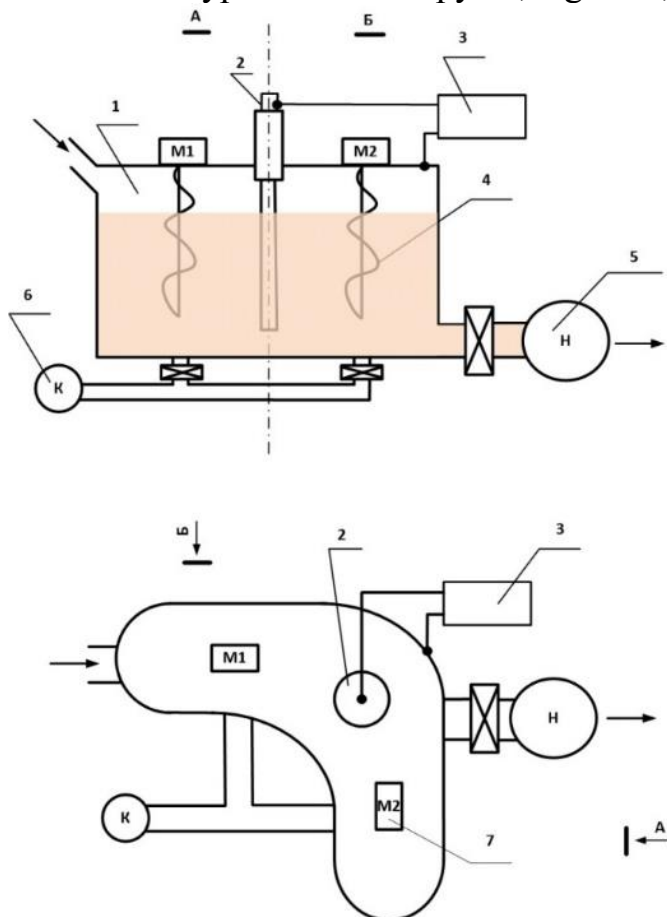


Рисунок 8 – Пилотная установка по обработке НЭМИ золотосодержащей пульпы: 1 – ёмкость 0,07 м³; 2 – электрод-излучатель; 3 – генератор НЭМИ; 4 – мешалки шнековидные – 2 шт.; 5 – насос для перекачки пульпы на фильтр мощностью 1,5 кВт; 6 – компрессор производительностью 0,8–1,0 м³/мин, мощностью 1,5 кВт;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

Таблица 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 обработка, руб.	5 429 433	6 786 792	7 691 697
Прибыль от Ag после обработка, 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·ч	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 диссертационной работе на основе проведенных экспериментальных исследований и разработанных научно-технических положений даны новые решения актуальных научных задач.

Основные выводы и результаты выполненного исследования заключаются в следующем:

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 ее 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.

Полученные результаты исследования носят прикладной характер и являются важным дополнением для дальнейшей разработки и внедрения эффекта воздействия НЭМИ на водную среду.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus

1. Krymsky V.V., Litvinova E.V. and Mingazheva J.G. Electropulse Processing of Gold-Bearing Ore // Materials Engineering and Technologies for Production and Processing II. – 2016. – V. 870. – P. 568–572
2. Krymsky V.V. and Mingazheva J.G. Electropulse The effect of electromagnetic pulse on the formation of copper crystals // High Energy Chemistry. – 2020. – V. 54. – No.5. – P. 378–382.
3. Krymsky V.V., Mingazheva J.G. and Sultanov Z.Y. Opening of sulfide gold-containing ores by nanosecond electromagnetic pulses in aqueous medium // Metallurgist. – 2021. – V. 64. – P. 1288–1294.

Статьи, опубликованная в журнале, входящем в перечень ВАК

1. Крымский В.В., Балакирев В.Ф., Мингажева Ю.Г., Плотникова Н.В. Электроимпульсные нанотехнологии // Нанотехнологии: разработка, применение. – XXI век. – 2016. – Т. 8 – № 1. – С. 21–29.
2. Крымский В.В., Мингажева Ю.Г. Воздействие наносекундных электромагнитных импульсов на сульфидную руду // Башкирский химический журнал. – 2019. – Т. 26 – № 1. – С.129–132.
3. Волокитин О.Г., Мингажева Ю.Г. Характеристики электродных систем в технологии обработки золотосодержащей пульпы наносекундными электромагнитными импульсами // Промышленная энергетика. – 2023. – № 8. – С. 35–42.
4. Волокитин О.Г., Мингажева Ю.Г. Технология обработки золотосодержащей пульпы наносекундными электромагнитными импульсами // Энергетик. – 2023. – № 11. – С. 56–49.

Патенты:

1. Патент на изобретение № 2605012 РФ. МПК: С1, С22В11/00, В03В7/00, С22В3/02, С22В3/04. Способ и устройство для обработки руд, содержащих благородные металлы / В.В. Крымский, Е.В. Литвинова, Ю.Г. Мингажева. – № 2015130612/02; заявл 23.07.2015; опубл. 20.12.2016.
2. Патент на полезную модель № 17761 РФ. МПК: В02С 19/18, С22В 1/00, В03В 7/00. Устройство для обработки руд, содержащих благородные металлы / В.В. Крымский, Ю.Г. Мингажева. – № 2017137540; заявл 26.10.2017; опубл. 02.03.2018.

Материалы конференций

1. Мингажева Ю.Г. Воздействие наносекундных импульсов на воду / Ю.Г. Мингажева // Сборник докладов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – 2014. – Т. 3. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета. – С. 95–96.
2. Мингажева Ю.Г. Очистка производственной и питьевой воды от тяжелых металлов / В.В. Крымский, Ю.Г. Мингажева // НАУКА ЮУРГУ. Материалы 66-й научной конференции – 2014. – Челябинск : Издательский

центр ЮУрГУ. – С. 1338–1341.

3. Мингажева Ю.Г. Очистка производственной воды от тяжелых металлов / Ю.Г. Мингажева // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции «Наука. Технологии. Инновации». – 2013. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет. – С. 22–25.

4. Мингажева Ю.Г. Очистка воды с помощью наносекундных электромагнитных импульсов / Ю.Г. Мингажева // Химия под знаком СИГМА: исследования, инновации, технологии: тезисы докладов IV Всероссийской научной молодежной школы-конференции. – 2014. – Новосибирск : Институт катализа СО РАН. – С. 254–255.

5. Мингажева Ю.Г. Исследование воздействия мощных наносекундных импульсов на водные растворы / Ю.Г. Мингажева // Сборник трудов XIII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук». – 2016. – Т. 2. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета. – С. 298–300.

6. Мингажева Ю.Г. Воздействие наносекундных электромагнитных импульсов на сульфидную руду / Ю.Г. Мингажева // Труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина. – 2017. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета. – С. 396–398.

7. Волокитин О.Г., Мингажева Ю.Г. Разработка лабораторной установки для обработки золотосодержащей пульпы / О.Г. Волокитин, Ю.Г. Мингажева // Труды XVI Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения». – 2023. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета. – С. 175–176.

8. Мингажева Ю.Г. Использование эффекта электроимпульсного воздействия на вещества в очистке питьевой воды / Ю.Г. Мингажева // Труды III Всероссийской молодежной конференции «Бутаковские чтения». – 2023. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета. – С. 434–436.

9. Пак А.Я., Мингажева Ю.Г. Применение наносекундных электромагнитных импульсов в процессе выщелачивания благородных и цветных металлов из руды / А.Я. Пак, Ю.Г. Мингажева // XXVIII Международный молодежный научный симпозиум имени академика М.А. Усова, посвященный 125-летию со дня рождения академика Академии наук СССР, профессора К.И. Сатпаева и 130-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора Ф.Н. Шахова «Проблемы геологии и освоения недр»– 2024. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета. – С. 125–126.