Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

**Пермский национальный исследовательский**

**политехнический университет**

Электротехнический факультет

Кафедра «Информационные технологии и автоматизированные системы»

**О Т Ч Е Т**

**по производственной практике,**

**научно-исследовательская работа (НИР)**

**заключительный отчет о НИР**

(**2 семестр**)

Тема исследования

Обзор существующих подходов к моделированию электроэрозионного станка

Выполнил студент гр. РИС-24-1м

Мехоношин В.А.\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(Фамилия, имя, отчество)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(подпись)

Проверил:

Доц. Каф. ИТАС\_Ярулин Д.В.

(должность, Ф.И.О. руководителя НИР)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(оценка) (подпись)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(дата)

Научный руководитель:

Проф. Каф. ИТАС\_Долгова Е.В.

(должность, Ф.И.О. )

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(оценка) (подпись)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(дата)

Пермь 2025

СОДЕРЖАНИЕ

[ВВЕДЕНИЕ 3](#_Toc197807070)

[1 Анализ процесса электроэрозионной обработки 5](#_Toc197807071)

[1.1 Электроэрозионная обработка 5](#_Toc197807072)

[1.2 Этапы процесса электроэрозионной обработки 6](#_Toc197807073)

[1.3 Компоненты электроэрозионного станка 7](#_Toc197807074)

[1.4 Виды электроэрозионной обработки 7](#_Toc197807075)

[2 Параметры, учитываемые в имитационных моделях 9](#_Toc197807076)

[2.1 Характеристики электрического импульса 9](#_Toc197807077)

[2.2 Свойства материалов и электродов заготовок 10](#_Toc197807078)

[2.3 Параметры диэлектрической жидкости 10](#_Toc197807079)

[3 Анализ функциональных требований 11](#_Toc197807080)

[4 Обзор существующих симуляторов станка 13](#_Toc197807081)

[5 Проблемы и ограничения 14](#_Toc197807082)

[6 Методы моделирования 15](#_Toc197807083)

[6.1 Классификация подходов 15](#_Toc197807084)

[6.2 Моделирование мeста разряда 16](#_Toc197807085)

[6.3 Моделирование физики искрового разряда 17](#_Toc197807086)

[6.4 Моделирование тепловых процессов 17](#_Toc197807087)

[6.5 Моделирование формирования результирующей поверхности детали 18](#_Toc197807088)

[6.6. Моделирование гидродинамики диэлектрика и удаления продуктов эрозии 18](#_Toc197807089)

[6.7 Моделирование износа электрода-инструмента 19](#_Toc197807090)

[6.8 Модели позволяющие напрямую узнать объем удаленного материала 19](#_Toc197807091)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 21](#_Toc197807092)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 22](#_Toc197807093)

# ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении существует устойчивая тенденция к миниатюризации деталей и созданию изделий с микро размерными элементами. Особую роль в производстве таких изделий играет электроэрозионная обработка, позволяющая формировать прецизионные элементы в деталях из труднообрабатываемых материалов независимо от их механических свойств.

Электроэрозионная обработка представляет собой сложный физико-технический процесс, при котором съем материала осуществляется за счет электрической эрозии, возникающей в результате импульсных разрядов между электродом-инструментом и обрабатываемой деталью. Данный метод позволяет получать отверстия диаметром от нескольких микрометров до нескольких миллиметров с высокой точностью и качеством поверхности.

Несмотря на широкое практическое применение, процесс электроэрозионной обработки встречается с множеством препятствий как при его исследовании, так и при изучении молодыми специалистами. Главными препятствиями является дороговизна оборудования и сложность отслеживания необходимых для исследования параметров.

**Объект исследования:** Процесс электроэрозионной обработки.

**Предмет исследования:** Существующие подходы к моделированию электроэрозионного станка и самого процесса электроэрозионной обработки.

**Актуальность** данной работы обусловлена необходимостью выбора адекватной математической модели процесса электроэрозионной обработки, позволяющей прогнозировать результаты обработки для дальнейшего ее применения в симуляторе электроэрозионного станка.

**Целью** работы является обзор подходов к моделированию процесса электроэрозионной обработки, учитывающей основные физические явления и позволяющей прогнозировать геометрические параметры получаемых отверстий.

**Задачи работы:**

* Проанализировать процесс электроэрозионной обработки, включая его основные этапы и компоненты станка;
* Определить ключевые параметры, которые необходимо учитывать в имитационных моделях. Сюда входят характеристики электрического импульса, свойства материалов заготовки и электродов, а также параметры диэлектрической жидкости;
* Проанализировать функциональные требования, предъявляемые к симулятору электроэрозионного станка;
* Выполнить обзор существующих на рынке симуляторов электроэрозионных станков;
* Выявить основные проблемы и ограничения, связанные с моделированием процесса электроэрозионной обработки;
* Провести обзор и классификацию методов моделирования.

# 1 Анализ процесса электроэрозионной обработки

## 1.1 Электроэрозионная обработка

Электроэрозионная обработка представляет собой бесконтактную технологию производства, которая обеспечивает удаление материала с электропроводящей заготовки посредством последовательности быстрых электрических разрядов, обычно называемых искрами.

Заготовка и электрод инструмент находятся в диэлектрической жидкости под напряжением на некотором расстоянии друг от друга. Это расстояние называется межэлектродным промежутком. Диэлектрическая жидкость, в данном случае, служит для стабилизации процесса эрозионного разрушения.

Разрушение материала заготовки происходит множественными электрическими импульсами, возникающими между электродом и заготовкой в межэлектродном промежутке. Напряжение на электроды подается от источника питания.

Электрическая энергия превращается в теплоту, которая приводит к нагреву как заготовки, так и электрода. Таким образом под воздействием высоких температур материал заготовки и электрода начинает плавиться, а затем испарятся.

После окончания электрического импульса плазменный канал схлопывается, что приводит к быстрому охлаждению и затвердеванию части расплавленного и испаренного материала. Быстрое расширение испаренного материала создает микровзрывы в искровом промежутке, выбрасывая расплавленный материал в диэлектрическую жидкость в виде осколков. Затем диэлектрическая жидкость играет решающую роль в смыве этих осколков и охлаждении промежутка, восстанавливая изоляцию между электродами.

В результате множественных разрядов на заготовке появляются перекрывающие друг друга лунки, благодаря которым происходит формирование желаемой формы заготовки.

Электроэрозионная обработка является одним из эффективных методов обработки труднообрабатываемых материалов. Особенность данного метода заключается в способности резать твердый материал без физического контакта между инструментом и заготовкой, где удаление материала происходит за счет искровой эрозии.

## 1.2 Этапы процесса электроэрозионной обработки

В процессе электроэрозионной обработки можно выделить несколько следующих друг за другом этапов выделение и рассмотрение которых может помочь в дальнейшем, при проектировании симулятора:

* подготовка оборудования и материалов;
* формирование межэлектродного зазора;
* генерация электрических импульсов;
* удаление продуктов эрозии;
* завершение обработки;
* анализ полученного результата.

Для повышения эффективности процесса электроэрозионной обработки, следует выбрать наиболее подходящий электрод-инструмент [2], а также подобрать параметры оборудования такие как: сила тока, напряжение, частота импульсов и межэлектродный зазор [3]. От выбранных параметров зависит качество обработки.

Далее, между электродом и заготовкой создается небольшой зазор, заполненный диэлектрической жидкостью. Этот зазор играет важную роль в стабильности процесса [3].

На данном этапе начинается обработка заготовки. Электрические импульсы высокой энергии создают локальные разряды, которые вызывают эрозию материала заготовки. В результате происходит удаление микроскопических частиц материала.

Продукты эрозии, такие как металлические частицы и газы, удаляются из зоны обработки с помощью диэлектрической жидкости.

После достижения заданной формы или размеров обработка прекращается, а заготовка очищается от остатков диэлектрической жидкости и продуктов эрозии.

После окончания обработки следует оценить качество поверхности обработанной заготовки, точность размеров и соответствие техническим требованиям.

## 1.3 Компоненты электроэрозионного станка

Электроэрозионный станок представляет собой сложную систему, состоящую из множества связанных между собой компонентов. Обзор данной структуры может быть полезен при проектировании компонентов будущего симулятора. Основные компоненты станка включают в себя:

* генератор импульсов. Данный компонент является ключевым в электроэрозионном станке. Он формирует последовательность электрических импульсов, подчиняющуюся заданным параметрам обработки;
* электрод. Формирует необходимую геометрию обрабатываемой поверхности. Может отличаться формой в зависимости от типа электроэрозионной обработки и требуемой формы заготовки;
* механическая система. Обеспечивает точное позиционирование электрода и заготовки;
* система ЧПУ. Управляет перемещением рабочих органов станка в соответствии с заданной программой. Также контролирует работу всех остальных компонентов.

## 1.4 Виды электроэрозионной обработки

Также, электроэрозионную обработку делят на несколько типов. Каждый из которых предназначен для решения конкретных задач [5]:

* + электроэрозионная обработка штамповкой – чаще всего использует фасонный электрод, часто являющийся негативной копией желаемой полости, для создания соответствующего отпечатка в заготовке [4];
  + проволочная эрозия – в этом процессе тонкая, непрерывно движущаяся проволока служит электродом для вырезания сложных двумерных форм в заготовке, как при работе с ленточной пилой [4];
  + эрозия малых отверстий – специально разработана для сверления небольших и глубоких отверстий в проводящих материалах, эта технология использует трубчатые электроды, через которые диэлектрическая жидкость часто подается в зону обработки [4].

Использование наиболее подходящего под ту или иную задачу типа обработки позволит добиться наилучшего результата.

# 2 Параметры, учитываемые в имитационных моделях

## 2.1 Характеристики электрического импульса

Главной категорией параметров, наиболее сильно влияющих на процесс и результат обработки, являются характеристики импульса электрического тока. Данные параметры определяют энергию, выделяемую в каждом разряде, что существенно влияет на удаление материала, износ инструмента и качество обработки поверхности.

К ключевым параметрам данной категории относится пиковый ток (Ip), он оказывает значительное влияние на скорость съема материала (MRR), износа электрода (EWR) и шероховатость поверхности (Ra). Более высокие пиковые токи обычно приводят увеличению энергии импульса, что приводит к повышению скорости удаления материала с заготовки материала, но также к более высокому износу электродов и повышенной шероховатости обрабатываемой поверхности [6].

Время включения импульса (Ton) — представляет собой продолжительность подачи электрического разряда и является еще одним важным параметром. Более короткое время включения может потенциально повысить эффективность электрического разряда и привести к увеличению скорости удаления материала (MRR), в то время как чрезмерно длительное время включения может привести к нежелательному расширению плазменного канала, снижению эффективности и увеличению расслоения расплавленного материала. Данный параметр также оказывает заметное влияние на износ электродов и шероховатость поверхности заготовки [6].

Время отключения импульса (Toff)— представляет собой промежуток времени между последовательными электрическими разрядами. Увеличение данного параметра позволяет плазменному каналу сузиться и уменьшить воздействие импульса на поверхность заготовки, что может привести к снижению скорости удаления материала (MRR). Этот параметр также играет значительную роль в износе электродов и шероховатости поверхности [6].

Кроме того, длительность разряда и эффективная частота разряда являются важными аспектами импульса тока, которые учитываются при моделировании процесса электроэрозионной обработки [7]. Напряжение (V), подаваемое между электродами, также является важным параметром, влияющим на данный рассматриваемый процесс [6].

## 2.2 Свойства материалов и электродов заготовок

Внутренние свойства материалов, использованных для изготовления электрода и заготовки, имеют значение для определения их реакции на интенсивные тепловое воздействие.

Теплопроводность влияет на эффективность распространения тепла внутри материалов [6], а удельная теплоемкость определяет количество необходимой энергии, которое следует сообщить заготовке для повышения температуры обрабатываемого материала [6].

Температура плавления характеризует точку, при которой материал начинает переходить из твердого состояния в жидкое [6]. Показатели теплоты плавления и испарения представляют собой энергию, поглощенную или высвобожденную во время этих фазовых переходов, и их учет крайне важен для точного моделирования механизма удаления материала [6].

Электрическое сопротивление влияет на выделение тепла при прохождении электрического тока через материалы [6].

## 2.3 Параметры диэлектрической жидкости

Диэлектрическая жидкость в электроэрозионной обработке выполняет множество важнейших функций, а ее параметры существенно влияют на процесс.

Ее изоляционные свойства необходимы для предотвращения преждевременного электрического разряда между электродами [8]. Ионизация диэлектрической жидкости является ключевым этапом в формировании плазменного канала, необходимого для протекания тока и последующего удаления материала [8].

Промывочная способность диэлектрической жидкости используется для эффективного удаления остатков, образующихся в процессе работы, и для охлаждения обрабатываемой зоны, обеспечивая тем самым стабильность процесса и предотвращая повторное отложение удаленного материала [8]. Тип используемой диэлектрической жидкости (например, масло, деионизированная вода, газ) может существенно влиять на характеристики разряда и процесс удаления материала [6].

Циркуляция и скорость потока диэлектрической жидкости также являются важными параметрами, влияющими на эффективность удаления мусора и охлаждения [9]. Кроме того, электрические свойства диэлектрической жидкости в межэлектродном объеме могут изменяться со временем из-за накопления мусора, что может повлиять на стабильность и характеристики электрических разрядов.

# 3 Анализ функциональных требований

Основная цель создания симулятора — предоставить пользователю возможность исследовать и анализировать процесс электроэрозионной обработки, не прибегая к дорогостоящим физическим экспериментам. Симулятор должен позволить моделировать различные параметры обработки, визуализировать результаты и оптимизировать технологические режимы.

Симулятор должен моделировать процесс удаления материала с заготовки под воздействием электрических разрядов. Пользователь, в свою очередь, сможет задавать различные параметры обработки. Моделирование будет происходить в реальном времени или с ускорением, в зависимости от выбранных параметров и вычислительных ресурсов.

Симулятор предоставит возможность визуализировать процесс обработки в трехмерном пространстве. Пользователь сможет наблюдать за изменением формы заготовки, образованием лунок и кратеров, а также за распределением температуры в материале.

Визуализация будет включать в себя:

* отображение заготовки и электрода-инструмента;
* распределение температуры в заготовке;
* динамику удаления материала и формирования поверхности.

Симулятор позволит анализировать результаты обработки, включая:

* количество удаленного материала;
* форму и размеры полученных отверстий;
* шероховатость поверхности;
* распределение температуры в заготовке.

Пользователь может получать графики и таблицы, отражающие изменение параметров обработки во времени.

Симулятор предоставит возможность изменять параметры обработки (напряжение, ток, длительность импульсов и пауз) и анализировать их влияние на процесс обработки. Это позволит пользователю находить оптимальные режимы обработки для достижения желаемых результатов.

Пользователь сможет проводить виртуальные эксперименты, изменяя параметры и наблюдая за их влиянием на производительность и качество обработки.

Симулятор будет учитывать износ электрода-инструмента в процессе обработки. Пользователь сможет наблюдать за изменением формы электрода и его влиянием на процесс обработки. Это позволит прогнозировать срок службы инструмента и планировать его замену.

Пользователь сможет сохранять параметры обработки и результаты моделирования для последующего анализа или повторного использования. Симулятор должен поддерживает загрузку ранее сохраненных сценариев, что позволяет сравнивать результаты различных экспериментов.

Симулятор предоставит возможность интерактивного управления процессом обработки. Пользователь может останавливать, приостанавливать и возобновлять процесс, а также изменять параметры в реальном времени. Это позволяет более гибко исследовать процесс и вносить коррективы в ходе моделирования.

Симулятор будет поддерживать моделирование обработки различных материалов, таких как сталь, медь, алюминий и другие. Пользователь сможет задавать физические свойства материала (плотность, теплопроводность, удельную теплоемкость, температуру испарения) для более точного моделирования.

# 4 Обзор существующих симуляторов станка

Наиболее распространенными симуляторами являются пакеты программного обеспечения CAM (система автоматизации технологической подготовки производства), которые включают функции симуляции для проверки траекторий обработки перед фактическим использованием станка.

Основные примеры симуляторов:

* bobCAD-CAM's Wire EDM CAD-CAM software: Это программное обеспечение предоставляет полный набор инструментов для проектирования и программирования проволочных ЭЭС. Оно включает функции симуляции для проверки траекторий обработки, что позволяет пользователям моделировать процесс и генерировать код G для станков, таких как Mitsubishi, Japax и другие [10];
* gibbsCAM: Это CAM-программное обеспечение предлагает симуляцию работы ЭЭС, позволяя пользователям проверять программы перед фактической обработкой. Оно подходит для различных типов станков, включая фрезерные, токарные и ЭЭС [11];
* CAMWorks' Wire EDM CAM software: Это программное обеспечение включает виртуальную симуляцию проволочных ЭЭС, что помогает автоматизировать программирование и проверять траектории обработки для 2- и 4-осевых станков [12];
* программное обеспечение Mitsubishi Electric для прошивных ЭЭС: Оно включает функции симуляции для измерений на станке и проверки процессов, что делает его полезным для пользователей прошивных ЭЭС [13].

Эти инструменты в основном предназначены для профессионалов в области программирования и производства, специализированные тренажеры для обучения операторов ЭЭС, не были обнаружены в открытом доступе.

Таким образом, существующие симуляторы электроэрозионных станков в основном представлены CAM-программным обеспечением с функциями симуляции для проверки траекторий обработки.

# 5 Проблемы и ограничения

Моделирование электроэрозионной обработки связанно со значительными трудностями. Данный процесс является мультифизическим. В нем одновременно протекают и взаимодействуют тепловые, электрические, гидродинамические и плазменные явления [14].

Также, процессу присуща стохастичность: местоположение, время возникновения и энергия каждого отдельного разряда подвержены случайным флуктуациям [15]. Что, в свою очередь, затрудняет точное предсказание формы и размера единичных кратеров, а также их взаимного влияния при формировании поверхности.

Наконец, прямое наблюдение и измерение физических явлений в межэлектродном зазоре, который имеет микронные размеры и заполнен диэлектриком, чрезвычайно затруднено, что усложняет валидацию моделей [6].

Помимо проблем, связанных с сложностью процесса, дополнительные ограничения накладывает необходимость достижения работы симулятора в реальном времени.

Таким образом, достижение 100% точности практически невозможно и основной задачей является нахождение модели, которая могла бы при относительно низкой ресурсоемкости прогнозировать процесс с достаточно высокой точностью.

# 6 **Методы моделирования**

Моделирование физических явлений, происходящих во время электроэрозионной обработки, является предметом многочисленных исследований. Точность этих моделей напрямую влияет на возможность прогнозирования ключевых выходных характеристик процесса, таких как скорость съема материала, износ инструмента и качество обработанной поверхности.

## 6.1 Классификация подходов

Многообразие физических явлений и целей моделирования привело к разработке различных подходов и методов для описания процесса ЭЭО. Их можно классифицировать по нескольким признакам.

Физические модели стремятся описать процесс ЭЭО на основе фундаментальных законов физики, таких как законы сохранения массы, импульса и энергии, уравнения теплопроводности, электродинамики, гидродинамики и физики плазмы [6]. Целью является понимание физических механизмов, лежащих в основе процесса, и предсказание его характеристик на основе этих механизмов.

Эмпирические модели,в отличие от физических, эти модели не ставят целью детальное описание механизмов процесса, а фокусируются на установлении математических зависимостей между входными параметрами (режимы обработки, свойства материалов) и выходными характеристиками (MRR, TWR, Ra и т.д.) на основе анализа экспериментальных данных [16].

Моделирование ЭЭО можно также разделить по масштабу рассматриваемого явления на модели единичного разряда и модели множественных разрядов.

Модели единичного разрядадетально анализируют физические процессы, происходящие во время одного изолированного электрического разряда [6]. Основное внимание уделяется формированию единичного кратера эрозии, поскольку его геометрия и объем определяют элементарный акт съема материала и влияют на последующую шероховатость поверхности [16].

Модели множественных разрядов, в свою очередь, направлены на описание реального процесса ЭЭО, который является результатом последовательного воздействия большого числа разрядов [6]. Они учитывают факторы, нерелевантные для одиночного разряда, такие как стохастическое распределение разрядов по поверхности, перекрытие кратеров, накопление и влияние продуктов эрозии (шлама) и газовых пузырей в МЭП, динамика изменения зазора из-за съема материала и износа ЭИ. Обобщенная модель процесса электроэрозионной обработки показанная на рисунке 1.

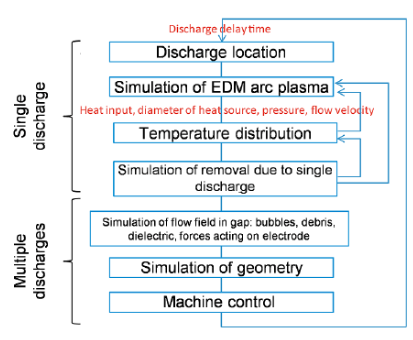


Рисунок 1 – Обобщенная модель процесса электроэрозионной обработки

## 6.2 Моделирование мeста разряда

Обычно разряд происходит в точках наименьшего расстояния между электродами. Однако, его месторасположение может изменяться при наличии в межэлектродном зазоре мусора или примесей [17]. Исходя из этого можно заключить, что данный процесс является стохастическим.

Учитывая стохастическую природу, многие модели используют вероятностные подходы для определения места разряда.

Первым походом является время задержки зажигания. В котором время между подачей импульса напряжения и фактическим началом протекания тока (пробоем) является случайной величиной, зависящей от локальных условий в МЭП (зазор, наличие шлама, пузырей) [6]. Модели могут предполагать, что разряд происходит в той точке МЭП, где случайное значение td​ оказывается минимальным в данный момент времени. Распределение td​ часто аппроксимируется экспоненциальным или другими статистическими законами, параметры которых зависят от ширины зазора и других факторов [6].

Также используется статистическое моделирование, в которомместо разряда может определяться путем генерации случайных координат на обрабатываемой поверхности в соответствии с определенным законом распределения вероятности. Это распределение может быть равномерным (простейший случай) или учитывать влияние геометрии зазора, концентрации шлама и т.д. [18]. Методы Монте-Карло часто используются для реализации таких подходов [18].

## 6.3 Моделирование физики искрового разряда

Наиболее распространенный подход для связи физики разряда с последующим тепловым анализом электродов заключается в использовании Гауссова распределения теплового потока [19]. Плазменный канал в этом случае рассматривается неявно, как источник тепла, приложенный к поверхности электрода.

## 6.4 Моделирование тепловых процессов

Тепловые процессы определяют основной механизм удаления материала в ЭЭО – плавление и испарение. Моделирование этих процессов позволяет прогнозировать форму и размер единичного кратера [19].

 Доминирующим методом является МКЭ, c помощью которого решается нестационарное уравнение теплопроводности в объеме электрода (обычно заготовки).

Моделирование удаления материала происходит различными способами. Одним из наиболее простых методов является удаление элементов из сетки при достижении ими температуры плавления или испарения.

Другим способом является моделирование по изотерме плавления, в котором граница кратера определяется изотермой, соответствующей температуре плавления материала в конце импульса или после некоторого времени.

## 6.5 Моделирование формирования результирующей поверхности детали

Обработанная поверхность в ЭЭО представляет собой сложный рельеф, сформированный наложением множества единичных кратеров.Моделирование этой топографии важно для прогнозирования шероховатости поверхности и визуализации результата обработки.

Форма и размер единичного кратера являются базовыми элементами для построения модели поверхности. Они зависят от энергии разряда и свойств материала, и могут быть получены из тепловых моделей (Раздел 1.6.4) или экспериментально.

Теоретически, МКЭ может моделировать последовательные разряды и формирование результирующей поверхности [19]. Однако, это требует огромных вычислительных ресурсов из-за необходимости многократного решения задачи с изменяющейся геометрией и случайным положением разрядов.

В случае моделей, где важен скорее порядок величины объема или основной тепловой эффект, а не точная геометрия поверхности, допустимо упрощение формы единичного кратера до полусферы [20].

## 6.6. Моделирование гидродинамики диэлектрика и удаления продуктов эрозии

Для моделирования гидродинамики чаще всего используются метод вычислительной гидродинамики (Computational fluid dynamics) [6]. Многофазные CFD симуляции с отслеживанием частиц являются очень ресурсоемкими. Для расчетов данных симуляций используется специализированное ПО: ANSYS Fluent, Star-CD, COMSOL.

## 6.7 Моделирование износа электрода-инструмента

Износ электрода-инструмента является неизбежным сопутствующим явлением ЭЭО, которое напрямую влияет на точность формы и размеров обрабатываемой детали. Моделирование износа электрода необходимо для прогнозирования и компенсации этого износа.

Износ ЭИ, так же, как и удаление материала с заготовки, происходит за счет плавления и испарения под действием тепла от плазменного канала [14]. Поэтому тепловые модели МКЭ, описанные в разделе 1.7.4, могут быть применены и для расчета износа ЭИ.

Из-за сложности точного физического моделирования, TWR часто прогнозируют с помощью эмпирических моделей, построенных на основе экспериментальных данных. Используются методы регрессии, RSM, ANN для установления зависимости TWR от электрических параметров (Ip​,Ton​,Toff​,Vg​), материала ЭИ, диэлектрика и т.д [21].

## 6.8 Модели позволяющие напрямую узнать объем удаленного материала

Также были обнаружены модели, позволяющие определить объем удаленного единичным разрядом материала. Например, модель, основанная на энергетическом балансе.

Целью разработки модели является оценка объема материала, удаляемого с поверхности электрода (как детали, так и инструмента, но фокус в статье все же отдан детали) в результате одного импульса. Модель учитывает, что общая энергия разряда распределяется на нагрев, плавление и испарение материала, а также на различные потери [22].

Достоверность разработанной модели авторы подтверждают экспериментальными исследованиями эрозии стали C45 и тяжелого вольфрамового сплава (WSC) при одиночных разрядах [22].

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данного исследования был проведен всесторонний обзор и анализ существующих подходов к моделированию процесса электроэрозионной обработки, что являлось основной целью настоящей работы. Было установлено, что электроэрозионная обработка представляет собой сложный многофакторный физико-технический процесс, моделирование которого сопряжено со значительными трудностями из-за одновременного протекания тепловых, электрических, гидродинамических и плазменных явлений, а также стохастического характера самого процесса.

В работе были рассмотрены ключевые аспекты процесса, такие как его этапы, основные компоненты электроэрозионного станка, и параметры, критически влияющие на результат обработки и, следовательно, требующие учета в имитационных моделях.

Анализ функциональных требований к симуляторам электроэрозионных станков показал необходимость не только в моделировании удаления материала и визуализации процесса, но и в возможности анализа результатов, оптимизации режимов, учета износа инструмента и работы с различными материалами.

Были подробно рассмотрены различные методы моделирования: физические и эмпирические, модели единичного и множественных разрядов.

Таким образом, выполненный обзор демонстрирует многообразие подходов к моделированию электроэрозионной обработки, каждый из которых обладает своими достоинствами и ограничениями. Выбор адекватной математической модели, способной с достаточной точностью прогнозировать результаты обработки при приемлемой ресурсоемкости, особенно для работы симулятора в реальном времени, остается ключевой задачей. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку гибридных моделей, сочетающих преимущества физического и эмпирического подходов.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Савицкий В.В. Электроэрозионные методы обработки материалов: учебное пособие для вузов – Витебск: УО "ВГТУ", 2006. – 276 с.
2. Ширяев В.В., Абляз Т.Р., Шлыков Е.С., Пустовалов Д.О., Смоленцев Е.В. Влияние микроструктуры электродаинструмента на эффективность процесса электроэрозионной обработки материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 75–81. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.2.09
3. Абляз Тимур Ризович, Ханов Алмаз Муллаянович, Севастьянов Валерий Васильевич Влияние межслойного зазора между заготовками на стабильность процесса пакетированной электроэрозионной обработки // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. №4-5. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-mezhsloynogo-zazora-mezhdu-zagotovkami-na-stabilnost-protsessa-paketirovannoy-elektroerozionnoy-obrabotki (дата обращения: 02.03.2025).
4. Working principles of electrical discharge machining. – Текст : электронный // Phillips Corp : [сайт]. – [India], 2022. – Обновлено 26.04.2022. – URL: https://phillipscorp.com/india/working-principles-of-electrical-discharge-machining/ (дата обращения: [15.03.2025])
5. Sild, S. Electrical Discharge Machining – Different Types, Applications, Pros & Cons / S. Sild. – Text : electronic // Fractory : [сайт]. – [Б. м.], 2022. – Обновлено 08.08.2022. – URL: https://fractory.com/electrical-discharge-machining-explained/ (дата обращения: [24.05.2025]).
6. Марадиа, У. Моделирование и симуляция электроэрозионной обработки / У. Марадиа, К. Вегенер. — Текст : непосредственный // Электроэрозионная обработка (EDM): типы, технологии и применение . — New York : Nova Science Publishers, 2015. — С. 67–121.
7. Weingärtner, E. Modeling and simulation of electrical discharge machining / E. Weingärtner, F. Kuster, K. Wegener. – Text : electronic // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 2. – P. 95–100. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.05.043. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827112001448 (дата обращения: [05.04.2025]).
8. Al-Mukhtar, S. Electrical Discharge Machining: A Complete Overview / S. Al-Mukhtar. – Text : electronic // Geomiq : [сайт]. – [Б. м.], [б. г.]. – URL: https://geomiq.com/blog/electrical-discharge-machining/ (дата обращения: [05.04.2025])
9. EDM Machining: Construction and Working Principle Discussed. – Текст : электронный // BDE Manufacturing Technologies : [блог]. – [Б. м.], 2021. – Опубликовано 25.06.2021. – URL: https://www.bdeinc.com/blog/edm-machining-construction-and-working-principle-discussed/ (дата обращения: [05.04.2025]).
10. CNC Wire EDM Software. – Текст : электронный // BobCAD-CAM : [сайт]. – [Б. м.], cop. 2025. – URL: <https://bobcad.com/products/wire-edm/> (дата обращения: [05.04.2025]).
11. GO Wire EDM. – Текст : электронный // GibbsCAM : [сайт]. – [Б. м.], [б. г.]. – URL: https://www.gibbscam.com/en/go-wire-edm (дата обращения: [05.04.2025]).
12. Wire EDM. – Текст : электронный // CAMWorks : [сайт]. – [Б. м.], [б. г.]. – URL: <https://camworks.com/modules/wire-edm/> (дата обращения: [10.04.2025]).
13. CAD/CAM. – Текст : электронный // MITSUBISHI ELECTRIC Factory Automation : [сайт]. – [Б. м.], [б. г.]. – URL: <https://www.mitsubishielectric.com/fa/products/mecha/edm/items/cadcam/index.html> (дата обращения: [11.04.2025]).
14. Progress in Simulation Modeling Based on the Finite Element Method for Electrical Discharge Machining / L. Li, S. Sun, W. Xing, Y. Zhang, Y. Wu, Y. Xu, H. Wang, G. Zhang, G. Luo. – Text : electronic // Metals. – 2024. – Vol. 14, iss. 1. – P. 14. – DOI: 10.3390/met14010014. – URL: https://www.mdpi.com/2075-4701/14/1/14 (дата обращения: [12.04.2025]
15. Numerical simulation of micro-EDM model with multi-spark / K. P. Somashekhar, S. Panda, J. Mathew, R. Nottath. – Text : electronic // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 68, iss. 1-4. – P. 83–90. – DOI: 10.1007/s00170-013-5319-9. – URL: https://www.researchgate.net/publication/272591096\_Numerical\_simulation\_of\_micro-EDM\_model\_with\_multi-spark (дата обращения: [16.04.2025]).
16. Nahak, B. A review on optimization of machining performances and recent developments in electro discharge machining / B. Nahak, A. Gupta. – Text : electronic // Manufacturing Review. – 2019. – Vol. 6. – P. 2 (article number). – 22 p. – DOI: 10.1051/mfreview/2018015. – URL: https://mfr.edp-open.org/articles/mfreview/pdf/2019/01/mfreview180009.pdf (дата обращения: [16.04.2025]).
17. Joshi, A. Y. A systematic review on powder mixed electrical discharge machining / A. Y. Joshi, A. Y. Joshi // Heliyon. – 2019. – Vol. 5. – Art. e029631. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02963.
18. Liu, J. F. Thermal Modeling of EDM with Progression of Massive Random Electrical Discharges / J. F. Liu, Y. B. Guo. – Text : electronic // Procedia Manufacturing. – 2016. – Vol. 5. – P. 495–507. – DOI: 10.1016/j.promfg.2016.08.041. – URL: https://www.researchgate.net/publication/309891807\_Thermal\_Modeling\_of\_EDM\_with\_Progression\_of\_Massive\_Random\_Electrical\_Discharges (дата обращения: [17.04.2025]).
19. Progress in Simulation Modeling Based on the Finite Element Method for Electrical Discharge Machining / L. Li, S. Sun, W. Xing [et al.]. – Text : electronic // Metals. – 2024. – Vol. 14, iss. 1. – Art. 14. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/14/1/14>
20. Salonitis, K. Thermal modeling of the material removal rate and surface roughness for die-sinking EDM / K. Salonitis, A. Stournaras, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris. – Text : electronic // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 40. – P. 316–323. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-007-1327-y>
21. Bellotti, M. Tool Wear and Material Removal Predictions in Micro-EDM Drilling: Advantages of Data-Driven Approaches / M. Bellotti, M. Wu, J. Qian, D. Reynaerts. – Text : electronic // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, iss. 18. – Art. 6357. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/18/6357>
22. Gulbinowicz, Z. Mathematical Modeling of Material Erosion During the Electrical Discharge / Z. Gulbinowicz, O. Goroch, P. Skoczylas // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2020. – Vol. 14, № 2. – P. 27–33. – DOI: 10.12913/22998624/114959.