



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

Институт ИЭЭ  
Кафедра ТЭВН

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ  
(бакалаврскую работу)**

**Направление** 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование)

**Направленность (профиль)** Высоковольтные электроэнергетика и  
электротехника

**Форма обучения** Очная  
(очная/очно-заочная/заочная)

**Тема:** Анализ параметров тока главной стадии разряда  
из искусственных аэрозольных облаков разной полярности

**Студент** Э-04-17   
группа подпись Бояркин Н.С.  
фамилия и инициалы

**Научный  
руководитель** к.т.н. доцент   
уч. степень должность подпись Черненский Л.Л.  
фамилия и инициалы

**Консультант** уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

**Консультант** уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

**Зав. кафедрой** к.т.н. доцент   
уч. степень звание подпись Хренов С.И.  
фамилия и инициалы

**Место выполнения работы** кафедра Техники и электрофизики высоких  
напряжений «Национального исследовательского университета «МЭИ»

## **СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ЗАДАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

**Цель работы** заключается в оценке влияния полярности искусственного грозового облака на параметры характеристик токов главной стадии разряда между облаком и заземлённым электродом на плоскости в присутствии в промежутке модельных гидрометеоров.

### **Содержание разделов задания.**

1. Обзор литературы, посвящённой следующим темам:

- методы создания искусственных заряженных аэрозольных образований;
- характеристики разряда, регистрируемые в ходе эксперимента и последующей обработки на экспериментальном стенде «Гроза».

2. Освоение алгоритма получения характеристик тока главной стадии разряда из искусственного грозового облака из данных, полученных в ходе экспериментов.

3. Обработка экспериментальных данных и анализ характеристик токов электрического разряда между заряженным облаком и землей для искусственных облаков различной полярности при наличии в промежутке модельных гидрометеоров.

### **Исходные данные.**

Массив экспериментальных данных, полученных для искусственных заряженных аэрозольных облаков различной полярности при наличии в промежутке модельных гидрометеоров.

## **ПЕРЕЧЕНЬ ГРАФИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА**

**Количество листов**

**Количество слайдов в презентации**

## **РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Электрофизические основы техники высоких напряжений. Учебник для вузов. Под редакцией Верещагина И.П., 3-ое издание, -М.: издательство МЭИ, 2018 г.

2. Анцупов К.В., Верещагин И.П., Кошелев М.А. и др. Методы получения заряженных аэрозольных образований и их использования/ Изв. АН СССР, Серия: Энергетика и Транспорт, 1990, т.36, с. 78-92.

3. Темников А. Г., Орлов А.В., Болотов В.Н., Ткач Ю.В. Исследование характеристик искрового разряда между искусственным облаком заряженного водного аэрозоля и землей // ЖТФ, 2005, т.75, вып. 7, стр. 52-59.

4. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молний и молниезащиты. –М.: Физматлит, 2001 г.

### **Примечания:**

- а) Задание брошюруется вместе с выпускной работой после титульного листа (страницы задания имеют номера 2, 3).
- б) Отзыв руководителя, рецензия(и), отчет о проверке на объем заимствований и согласие студента на размещение работы в открытом доступе вкладываются в конверт (файловую папку) под обложкой работы.

## АННОТАЦИЯ

Студент: Бояркин Никита Сергеевич

Тема: «Анализ параметров тока главной стадии разряда из искусственных аэрозольных облаков разной полярности».

Работа содержит:

- 59 страниц;
- 36 рисунков;
- 3 таблицы.

Ключевые слова: ИСКУССТВЕННОЕ ГРОЗОВОЕ ОБЛАКО, ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛАВНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА, СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, ЗАРЯЖЕННЫЕ АЭРОЗОЛИ РАЗНОЙ ПОЛЯРНОСТИ.

Выполнены исследования влияния полярности искусственного грозового облака на параметры тока главной стадии разряда. Разработаны программы для обработки, анализа и графического представления экспериментальных данных. Выявлена корректность обрабатываемых экспериментальных данных. Установлены статистические взаимосвязи между полярностью искусственного грозового облака и параметрами тока.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Глава 1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ ПОСВЯЩЕННОЙ МЕТОДАМ СОЗДАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «ГРОЗА».....	8
1.1. Методы зарядки аэрозольных частиц.....	8
1.1.1. Механизмы зарядки аэрозольных частиц .....	8
1.1.2. Зарядка частиц коронным разрядом.....	11
1.2. Аэрозольные газодинамические устройства.....	14
1.2.2. Конденсационные ЭГД-генераторы заряженного аэрозоля .....	16
1.2.3. ЭГД-генераторы.....	17
1.3. Характеристики разряда, регистрируемые в ходе эксперимента и последующей обработки на экспериментальном стенде «Гроза» .....	19
1.3.1. Обзор экспериментального комплекса «ГРОЗА» .....	19
Выводы по 1-й главе: .....	23
Глава 2. АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОКА ГЛАВНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА ИЗ ИСКУССТВЕННОГО ГРОЗОВОГО ОБЛАКА ИЗ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ХОДЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ .....	24
2.1. Получение характеристик тока главной стадии разряда из искусственного грозового облака из данных .....	24
2.1.1. Программное обеспечение для получения данных.....	24
2.1.2. Процесс обработки полученных данных .....	32
2.2. Выводы по 2-й главе.....	40
Глава 3. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТОКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА МЕЖДУ	

ЗАРЯЖЕННЫМ ОБЛАКОМ И ЗЕМЛЕЙ ДЛЯ ИСКУССТВЕННЫХ ОБЛАКОВ РАЗЛИЧНОЙ ПОЛЯРНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ В ПРОМЕЖУТКЕ МОДЕЛЬНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОВ .....	41
3.1. Обработка исходных экспериментальных данных .....	41
3.2. Проверка корректности данных .....	43
3.3. Статистическая обработка подготовленных данных .....	45
3.4. Графическое представление обработанных данных.....	48
3.5. Выводы по 3-ей главе .....	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	57
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	60
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	61

## ВВЕДЕНИЕ

Молния представляет собой электрический искровой разряд в атмосфере, сопровождающийся вспышкой и резким звуком (громом). Воздействие молнии на различные объекты активно изучается, так как молния представляет угрозу как для нормального функционирования предприятий, так и для жизни человека. Согласно статистике, ежегодно из-за поражения молнией в мире погибает порядка 6000 человек [1]. Из-за ударов молнии происходят аварии на различных объектах, пожары, взрывы, нарушения электроснабжения и т.д.

Для предотвращения удара молнии в наземные объекты и летательные аппараты используют молниеводы. Для правильной организации конструкции молниезащиты необходимо знать параметры разряда молнии. Эти параметры нужны и при разработке и анализе систем пеленгации молнии.

Существует несколько параметров молнии, статистическая обработка которых может дать основное представление об ее ударе, такие как: ток молнии, крутизна фронта импульса при ударе молнии, длительность импульса, переносимый заряд.

При правильной обработке статистических данных можно будет предсказать, какие параметры разряда молнии следует ожидать.

Имеющийся в НИУ «МЭИ» экспериментальный комплекс «Гроза» позволяет создавать искусственные облака заряженного аэрозоля отрицательной и/или положительной полярности потенциалом до 1,5 МВ с предельной плотностью объемного заряда, соответствующей грозовым облакам и обеспечивает возможность реализации различных типов электрических разрядов, характерных для грозовых облаков.

Проведение экспериментов при помощи этого комплекса и последующая обработка данных, полученных в результате эксперимента, позволит статистически выявить значения параметров разряда молнии и оценить влияние полярности облака на эти параметры.

Целью работы является исследование влияния полярности искусственного заряженного облака на параметры главной стадии разряда между заряженным облаком и землей в присутствии в промежутке модельных гидрометеоров.

В данной работе будут выполнены следующие задачи:

- анализ литературы по методам создания искусственных заряженных аэрозольных образований;
- изучение характеристик разряда, регистрируемых в ходе эксперимента и последующей обработки на экспериментальном стенде «Гроза»;
- освоение программы обработки осцилограмм AnalyzeResults для получения характеристик разрядного тока;
- обработка с помощью программы AnalyzeResults результатов экспериментов;
- разработка программы обработки полученных данных для сравнительного анализа данных экспериментов;
- проведение сравнительного анализа характеристик разряда из искусственного грозового облака;
- формулировка выводов о влиянии полярности на характеристики разряда между искусственным заряженным облаком и землей в присутствии в промежутке модельных гидрометеоров.

# Глава 1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ ПОСВЯЩЕННОЙ МЕТОДАМ СОЗДАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «ГРОЗА»

## 1.1. Методы зарядки аэрозольных частиц

### 1.1.1. Механизмы зарядки аэрозольных частиц

Можно выделить несколько основных механизмов, которые приводят к созданию на частице электрического заряда:

- ионная зарядка;
- индукционная зарядка;
- статическая электризация. [2, стр.372]

Суть первого метода в том, что ионы, движущиеся в газовой среде и сталкивающиеся с частицей, осаждаются на ее поверхности. Обратно ионы не могут возвратиться из-за того, что они должны иметь определенную энергию для преодоления потенциального барьера на границе раздела сред. В результате чего происходит накопление ионов на частице. [2]

Источником ионов одного знака служит унипольярный коронный разряд. Однако в других случаях могут быть использованы другие виды разряда (например, поверхностный). Также, газ можно ионизировать под действием ионизирующего облучения.

Поток ионов на частицу может быть определен как движением ионов под действием электрического поля, так и движением под действием, вызванным диффузией ионов.

Поток ионов определяется выражением (1).

$$f = n * k * E - D * \text{grad}(n), \quad (1)$$

где  $f$  – поток ионов;  $n$  – концентрация ионов,  $k$  – подвижность ионов,  $E$  – напряженность поля у поверхности частицы;  $D$  – коэффициент диффузии.

Из выражения (1) следует, что ионная зарядка частиц может быть «ударной», т.е. под действием на ионы сил электрического поля при выполнении неравенства  $n * k * E > D * \text{grad}(n)$ , а также «диффузионной», т.е. под действием диффузионного механизма, что достигается при выполнении неравенства  $n * k * E < D * \text{grad}(n)$ .

Известно, что на механизм ионной зарядки влияет прежде всего размер заряжаемой частицы  $a$ .

Так, при выполнении неравенства  $2 * a \gg 1 \text{ мкм}$  преобладает «ударный» механизм ионной зарядки частиц, а «диффузионный» механизм – при выполнении неравенства  $2 * a \ll 0,1 \text{ мкм}$ .

Максимальный заряд, получаемый частицей при «ударном» механизме ионной зарядки:

$$q_m = 4 * \pi * \varepsilon_0 * k_\varepsilon * a^2 * E_{\text{вн}}, \quad (2)$$

где  $q_m$  – максимальный заряд частицы;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $k_\varepsilon$  – коэффициент, учитывающий диэлектрические свойства частицы и равный  $\frac{3 * \varepsilon}{\varepsilon + 2}$ ;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость частицы;  $E_{\text{вн}}$  – напряженность внешнего поля.

При упрощении формулы (2), считая, что диэлектрическая проницаемость проводящей частицы стремится к бесконечности, а коэффициент  $k_\varepsilon = 3$ , можно получить, что максимальный заряд частицы при «ударном» механизме ионной зарядки равен:

$$q_m = 12 * \pi * \varepsilon_0 * a^2 * E_{\text{вн}}.$$

Для нахождения заряда, получаемого частицей, при «ударном» механизме ионной зарядки можно воспользоваться формулой Понетье:

$$q(t) = q_m \frac{e * n_0 * k * t}{4 * \varepsilon_0 + e * n_0 * k * t},$$

где  $e$  – заряд электрона;  $n_0$  – концентрация ионов вдоль поверхности частицы;  $t$  – время зарядки.

Метод электростатической индукции можно объяснить, рассмотрев поведение сферической частицы в поле плоского конденсатора, представленного на рисунке 1 [2].

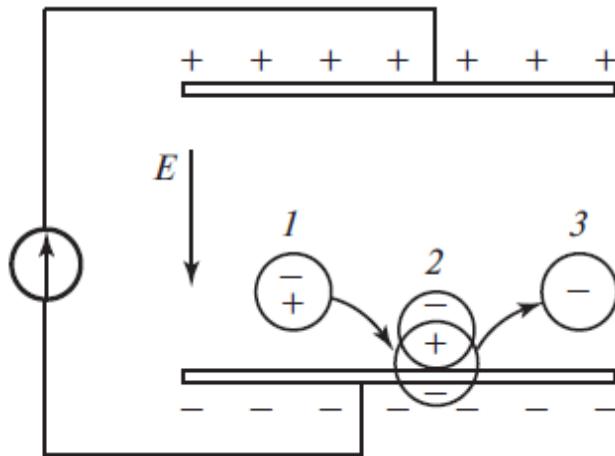


Рисунок 1 - Схема индукционной зарядки частиц.

В позиции 1 частица поляризуется. При последующем контакте поляризованной частицы и электрода в позиции 2 происходит нейтрализация ближайшего к точке контакта поляризационного заряда. Затем, если происходит отрыв частицы в позиции 3, то она уносит с собой избыточный заряд.

Таким образом, индукционный механизм электризации включает в себя поляризацию частицы в электрическом поле и нейтрализацию одного из зарядов. Необязательно, что это произойдет в результате нейтрализации заряда при контакте. Например, разделение зарядов происходит при разрыве капель в электрическом поле [2, стр.373].

Статическая электризация обусловлена контактом и последующем разделением тел, обладающих различными физическими или химическими свойствами. Контактирующие тела приобретают заряды различных знаков. Статическая электризация может происходить и в отсутствии внешнего поля. Основной физической величиной, определяющей электрические явления при контакте твердых тел, является работа выхода электрона. Разница работ выхода электрона у контактирующих тел проводит к нарушению их нейтрального

состояния. Материал, для которого работа выхода  $A_{вых}$  меньше, при контакте легче теряет электроны и, таким образом, заряжается положительно. Значение образующихся зарядов пропорционально разнице работ выхода. [2].

Для нахождения знака заряжаемых частиц при зарядке с помощью статической электризации применяется правило Коэна: при контакте и разъединении двух диэлектриков вещество с большей относительной диэлектрической проницаемостью заряжается положительно.

Однако, состояние поверхности контактирующих частиц зависит от множества факторов, например параметры внешней среды, загрязнённость поверхности и т.д. Поэтому приобретаемые заряды зависят от конкретных условий и в большинстве случаев определяются экспериментально.

### 1.1.2. Зарядка частиц коронным разрядом

Коронный разряд – форма самостоятельного разряда, возникающего в резко неоднородных электрических полях. Главная особенность коронного разряда заключается в том, что ионизационные процессы происходят не по всей длине промежутка, а вблизи электрода с малым радиусом кривизны, который называется коронирующим электродом.

Коронный разряд используется в подавляющем числе технологий для создания искусственных заряженных аэрозольных образований.

Часть промежутка, где происходят ионизационные процессы, называется чехлом коронного разряда, а часть промежутка, где происходит движение (дрейф) заряженных частиц – зоной дрейфа.

Коронный разряд подразделяется на два вида:

- биполярный;
- униполярный.

Если в зоне дрейфа существуют положительные и отрицательные заряды, такой коронный заряд называется биполярным, а если только одного знака, то униполярным.

В общем случае зарядка коронным разрядом осуществляется при нахождении заряжаемой частицы на электроде в поле униполярного коронного разряда.

Физический механизм зарядки частиц заключается в том, что ионы, перемещаясь к поверхности частицы под действием электрического поля и в результате процесса диффузии, захватываются частицей за счет сил зеркального отображения ионов в поверхности частицы [3].

С увеличением размера частиц уменьшается величина градиента концентрации ионов у поверхности частиц, а следовательно, уменьшается вклад процесса диффузии в зарядку и возрастает роль движения ионов под действием поля.

Изменение заряда во времени, может быть рассчитано интегрированием потока ионов по поверхности частицы и во времени.

При определении предельного заряда для диэлектрических частиц обычно предполагается, что избыточный заряд распределен как в проводнике, то есть по поверхности частицы.

Формула для нахождения предельного заряда частицы записывается следующим образом:

$$q_{\infty} = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot b \cdot c \cdot E_{\text{вн}} \cdot (\epsilon_1 \cdot \gamma_{v2} - \gamma_{v1})}{\gamma_{v1} \cdot d_a + \gamma_{v2} \cdot (1 - d_a)},$$

где  $q_{\infty}$  - предельный заряд частицы;  $b$ ,  $c$  – размеры полуосей частицы в форме полуэллипсоида;  $\epsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость частицы;  $\gamma_{v1}$  - удельная электропроводность частицы;  $\gamma_{v2}$  – удельная электропроводность среды;  $d_a$  - коэффициент деполяризации эллипсоида в направлении оси  $x$ .

Приобретенный заряд частицы может быть найден как:

$$q(t) = q_{\infty} * (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$

где  $q(t)$  – приобретенный заряд частицы;  $\tau$  - постоянная времени зарядки частицы.

Постоянная времени зарядки частицы определяется выражением:

$$\tau = \varepsilon_0 * \frac{\varepsilon_1 * d_a + 1 - d_a}{\gamma_{v1} * d_a + \gamma_{v2} * (1 - d_a)}.$$

Схема зарядки частицы в поле коронного разряда показана на рисунке 2.

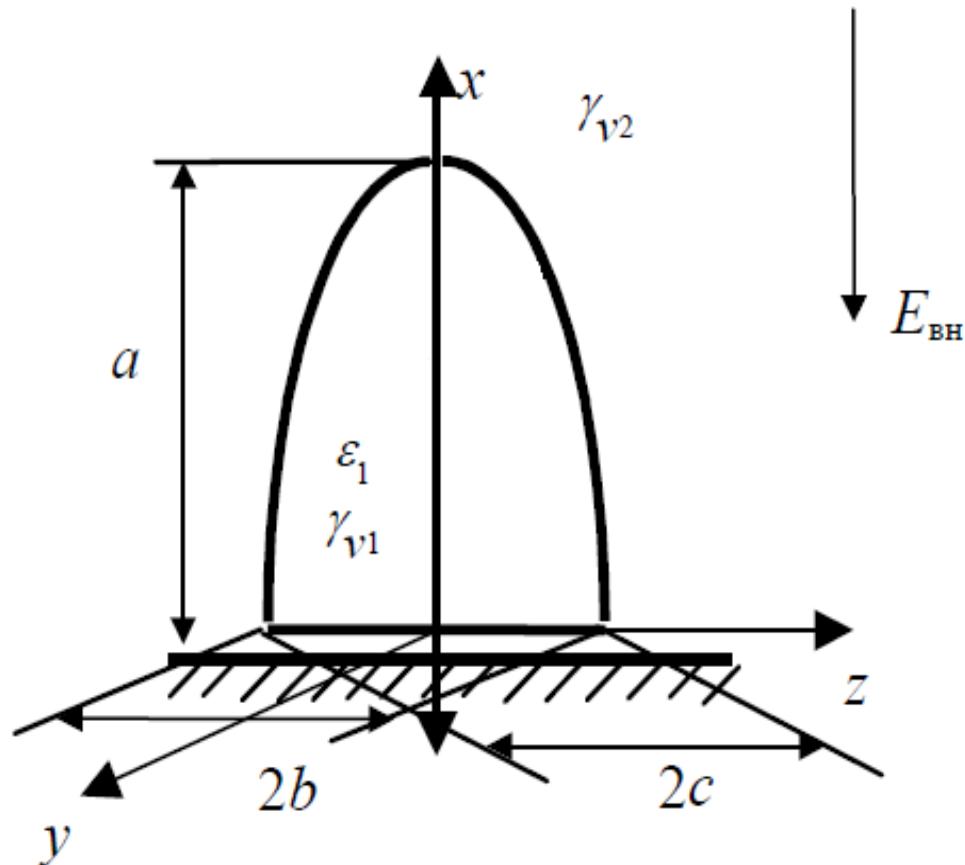


Рисунок 2 – Частица в поле коронного разряда.

Приняв концентрацию ионов для полей коронного разряда  $n_i = 10^{14} \text{ м}^{-3}$ , получаем, что за время, равное  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$  и  $10^{-1}$  с, частица приобретает заряд, равный соответственно 8, 45 и 90% своего предельного значения [3].

Для частиц малого размера поток ионов на частицу определяется градиентом концентрации ионов вблизи частицы, так как на некотором расстоянии от частицы концентрация ионов равна концентрации, определяемой

коронным разрядом, а непосредственно у поверхности она равна нулю. Нулевая концентрация ионов у поверхности частицы обусловлена тем, что из-за действия у поверхности сил зеркального отображения частица поглощает все ионы.

При анализе сил, действующих на частицу в поле коронного разряда, было выяснено, что на частицу в основном действуют сила электрического поля и сила сопротивления среды [3].

## 1.2. Аэрозольные газодинамические устройства

### 1.2.1. Общие сведения

Основной группой устройств, при помощи которых можно получить искусственное облако заряженного аэрозоля являются электрогазодинамические устройства.

В аэрозольных электрогазодинамических (ЭГД) устройствах имеет место одновременное движение заряженных жидких или твердых частиц малого размера в электрическом поле и под действием потока газа или воздуха. Отличительной чертой этих устройств является то, что роль газового потока не сводится только к пассивному переносу частиц. Взаимодействия заряженных движущихся в электрическом поле частиц с потоком приводит к существенному изменению газодинамических характеристик самих потоков: скорости, давления, температуры. Это связано с отбором или вводом дополнительной энергии в поток [4, стр.194].

Основным элементом электрогазодинамического устройства является профилированный газодинамический канал с диэлектрическими стенками (рисунок 3).

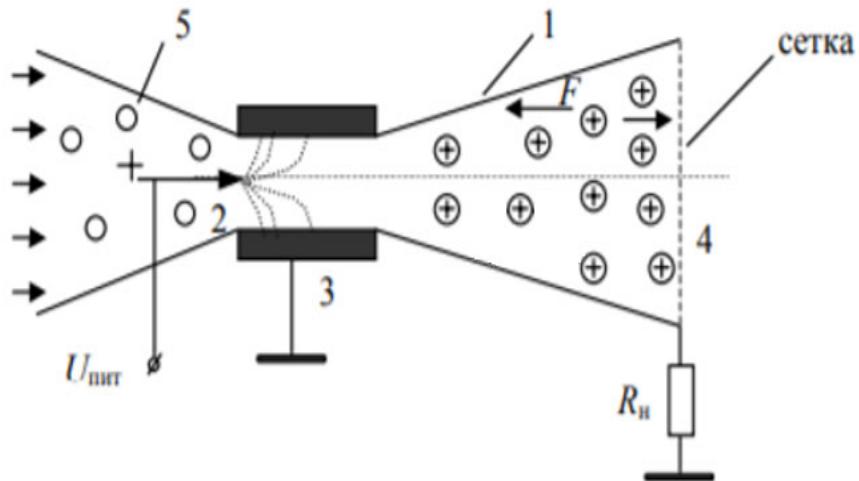


Рисунок 3 – Общая схема электрогазодинамического устройства:

1 – профилированное сопло; 2,3,4 – электроды; 5 – частицы аэрозоля;  $U_{пит}$  – напряжение питания;  $R_n$  – сопротивление нагрузки;  $F$  – сила, действующая на частицу.

Профиль канала рассчитывается таким образом, чтобы получить наиболее благоприятное для работы устройства распределение скорости и давления в потоке по длине. Например, в наиболее узкой части канала получается наибольшая скорость. Чтобы обеспечить при возрастании скорости переход через звуковой барьер, используется сопло Лаваля, состоящее из сочетания сходящихся – расходящихся конических частей.

Вторым важным элементом устройства является ряд электродов, кольцевых или в виде игл и сеток, которые соединены с источником высокого напряжения или подключены к нагрузке (рисунок 3, электроды 2, 3, 4). В зависимости от назначения количество электродов, их расположение и форма могут быть самыми различными. Под действием напряжения, приложенного к электродам или зарядов, накопленных на них, в устройстве создаются электрические поля, совпадающие или противоположные по направлению газовому потоку.

Поток газа содержит частицы определенного размера и концентрации. Эти частицы вводятся в поток специальным устройством – распылителем порошкового материала или жидкости. Второй вариант, когда в электрогазодинамических устройствах конденсационного типа частицы получаются в результате процессов конденсации пересыщенного пара, если, например, используется влажный воздух или водяной пар. Аналогичные условия имеют место в отношении зарядки частиц. Заряд частицам сообщается либо предварительно за пределами устройства или они заряжаются тем или иным способом внутри сопла. В рассматриваемых устройствах целесообразно использовать частицы размером  $0,3 \div 0,7$  мкм, так как частицы подобного размера обладают минимальной подвижностью в электрическом поле. Минимальная подвижность частиц является условием для наиболее интенсивного обмена энергией между частицами и потоком. При использовании в качестве заряженных частиц ионов, подвижность которых в электрическом поле на несколько порядков выше, приводит к проскальзыванию и неполному увлечению их потоком и, как результат, недостаточно эффективному обмену энергией между частицами и потоком. На основе процессов конденсации с последующим укрупнению частиц в условиях пересыщения могут быть получены частицы размером, примерно соответствующим минимуму подвижности. Характерными представителями рассматриваемых устройств являются конденсационные ЭГД-генераторы заряженного аэрозоля, ЭГД-генераторы (источники электроэнергии), ЭГД-компрессоры (для перекачки газа или жидкости) [4].

### 1.2.2. Конденсационные ЭГД-генераторы заряженного аэрозоля

Работа устройства объясняется при помощи рисунка 3. В качестве рабочей среды применяется водяной пар, который поступает в сходящееся коническое сопло слева. При движении в сходящемся коническом сопле скорость его

движения возрастают, а давление и температура падают. Режим подбирается таким, чтобы перед входом в цилиндрическую часть сопла пар переходил в насыщенное состояние, и в результате конденсации образовывались капли воды. Зарядка обеспечивается за счет коронного разряда между иглой 2 и кольцевым электродом 3 при подаче постоянного напряжения на иглу. Положительные ионы во внешней области коронного разряда осаждаются на каплях и на выходе цилиндрической части устройства формируется поток заряженного аэрозоля. Правая часть сопловой системы профиiliруется таким образом, чтобы избежать накопления объемного заряда на выходе (скорость потока должна быть больше  $15\div20$  м/с) и обеспечить отсутствия разрядов между струей заряженного аэрозоля и заземленными частями оборудования вблизи выхода генератора. Основной характеристикой генераторов заряженного аэрозоля является ток выноса, который измеряется в цепи сетчатого коллектора, размещенного на выходе генератора (электрод 4).

### 1.2.3. ЭГД-генераторы

Это устройство служит для преобразования энергии газового потока в электрическую энергию. Работает устройство следующим образом. Высокоскоростной газовый поток (скорость потока  $V_{\text{пот}} \geq 50$  м/с) содержащий мелкодисперсные частицы (при радиусе частицы в потоке газа  $a \approx 0,05\div0,35$  мкм) поступает в зарядное устройство, образованное коронирующим (сетка с иглами) и заземленным (сетка) электродами.

Схема простейшего варианта ЭГД-генератора представлена на рисунке 4.

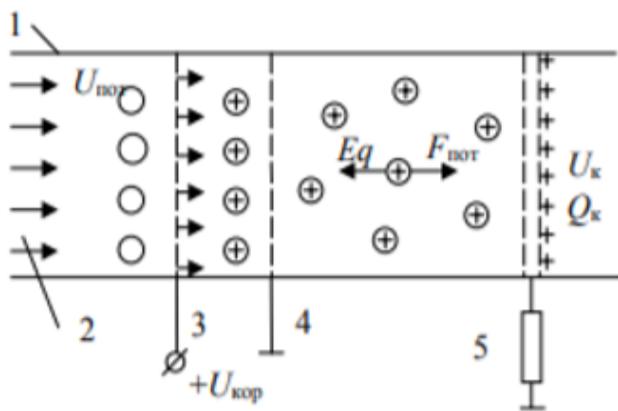


Рисунок 4 – Схема ЭГД-генератора:

1 – канал с диэлектрическими стенками; 2 – газовый поток; 3 – коронирующий электрод зарядного устройства; 4 – заземленный электрод-сетка; 5 – коллектор;  $U_{\text{пот}}$  – напряжение в потоке газа;  $Eq$  – электрическая сила;  $F_{\text{пот}}$  – газодинамическая сила;  $U_{\text{кор}}$  – напряжение коронного разряда;  $U_{\text{k}}$  – напряжение на коллекторе;  $Q_{\text{k}}$  – накопленный на коллекторе заряд.

Частица заряжается во внешней зоне коронного разряда. Если на электрод 3 (рисунок 4) подано постоянное напряжение положительной полярности, то частицы приобретают положительный заряд. Далее заряженные частицы с потоком поступают в рабочий промежуток между электродами 4 и 5. Коллектор 5 состоит из параллельных рядов металлической сетки для того, чтобы заряженные частицы, сталкиваясь с поверхностью коллектора, отдавали ему свой заряд. Таким образом на коллекторе накапливается заряд  $Q_{\text{k}}$ , и он приобретает разность потенциалов  $U_{\text{k}}$  относительно заземленных электродов. В рабочем промежутке на частицы действует электрическая сила  $F_q = E * q$ , обусловленная напряжением на коллекторе, и противоположно действующая гидродинамическая сила, увлекающая частицы с потоком. Накопление заряда на коллекторе и, следовательно, увеличение напряжения  $U_{\text{k}}$  будет происходить до тех пор, пока газодинамическая сила будет превосходить тормозящую электрическую силу. Другой возможный предельный случай определяется

пробоем из-за увеличения напряженности в рабочем промежутке. В качестве характерных параметров ЭГД-генераторов можно указать напряжение на коллекторе  $\approx 100$  кВ и ток в цепи нагрузки  $\approx 100$  мА при напряжении на зарядном устройстве  $\approx 10$  кВ и примерно том же значении тока. Таким образом, выигрыш в получаемой мощности соответствует соотношению между напряжением на коллекторе и напряжением на зарядном устройстве.

1.3. Характеристики разряда, регистрируемые в ходе эксперимента и последующей обработки на экспериментальном стенде «Гроза»

#### 1.3.1. Обзор экспериментального комплекса «ГРОЗА»

Экспериментальный комплекс «ГРОЗА» позволяет создавать искусственные грозовые облака отрицательной или положительной полярности или систему из двух униполярно или разнополярно заряженных грозовых ячеек в аэрозольной камере или открытом пространстве потенциалом в несколько МВ и обеспечивает формирование всех стадий разряда молнии. Параметры создаваемых искусственных грозовых облаков:

- Полярность – отрицательная, положительная, биполярная;
- Наибольший потенциал – 1,5 МВ;
- Длина инициируемых разрядов – до 2 м;
- Предельная плотность объемного заряда в облаке – до 0,01 Кл/м<sup>3</sup>;
- Напряженность электрического поля, создаваемого искусственным грозовым облаком, вблизи заземленной плоскости может достигает 12 кВ/см, у границ облака заряженного аэрозоля 22 кВ/см.

Экспериментальный комплекс «Гроза» состоит из аэрозольной камеры объёмом 250 м<sup>3</sup>, генератора заряженного аэрозоля конденсационного типа, исследуемой электродной системы и измерительного комплекса. Горизонтальный заземлённый электростатический экран, на который

устанавливаются объекты исследования, располагается на высоте 0,4 м над полом [5].

Давление водяного пара обеспечивается на уровне 5-9 атмосфер, ток выноса генератора составляет 100-130 мкА. В результате над заземлённой плоскостью образуется заряженное аэрозольное облако объёмом в несколько кубических метров, объёмная плотность заряда в котором может достигать 0,01 Кл/м<sup>3</sup>.

Распределение напряжённости электрического поля и потенциала в вертикальном сечении, проходящем через ось струи заряженного аэрозоля, от нижней границы горизонтальной заземлённой плоскости до высоты 2 м над ней показаны на рисунке 5 и рисунке 6 соответственно.

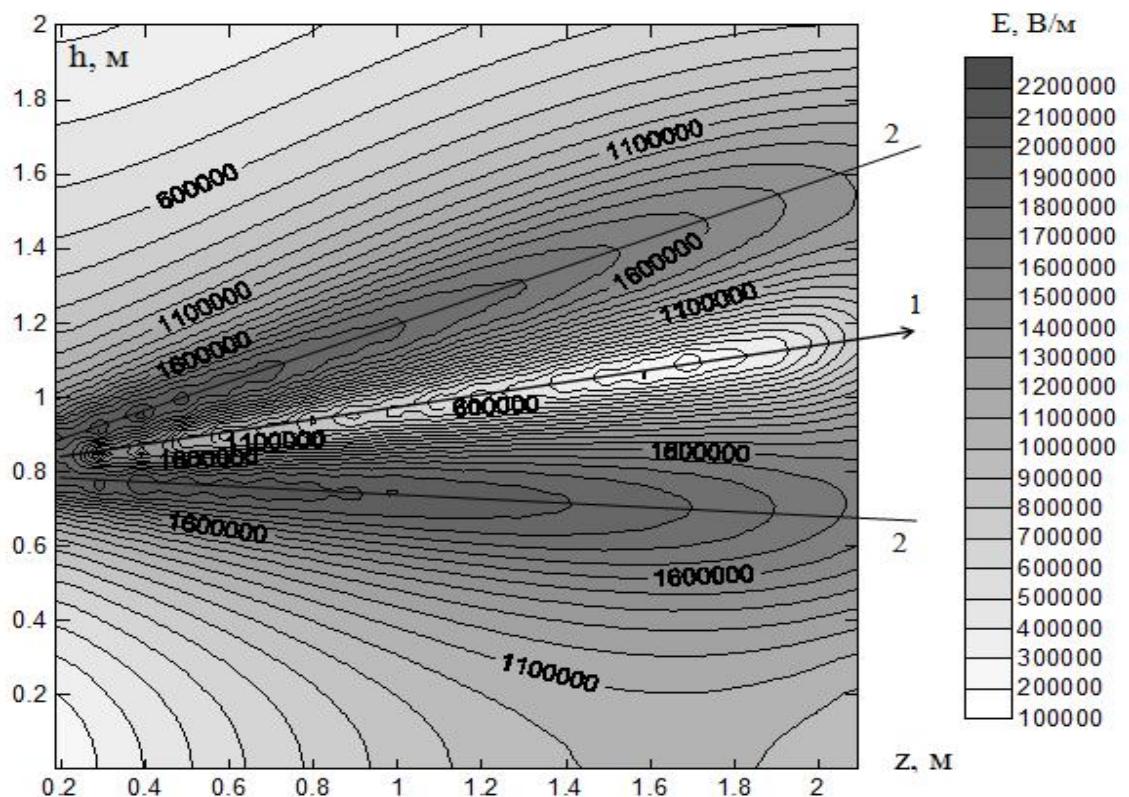


Рисунок 5 - Распределение напряжённости электрического поля.

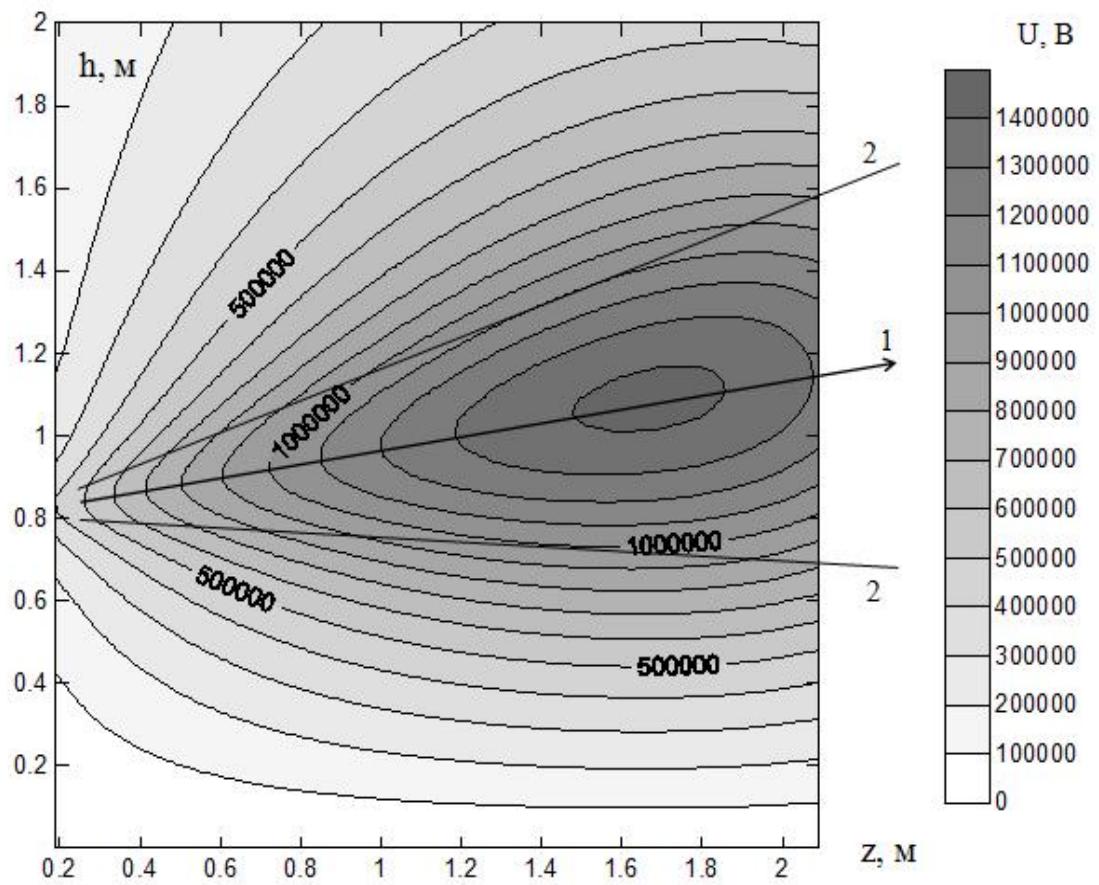


Рисунок 6 – Распределение потенциала.

Ток разряда протекал через стержневой электрод и измерялся на малоиндуктивном шунте цифровым осциллографом Tektronix DPO 7254. Синхронно с осциллограммами тока разрядные явления регистрировались цифровым фотоаппаратом Panasonic DMC 50 и программируемой электронно-оптической камерой K011.

На рисунке 7 приведена схема эксперимента разряда в промежутке между искусственной грозовой ячейкой и землей на экспериментальном стенде «Гроза».

На рисунке 8 показано фото разрядных процессов в ходе эксперимента.

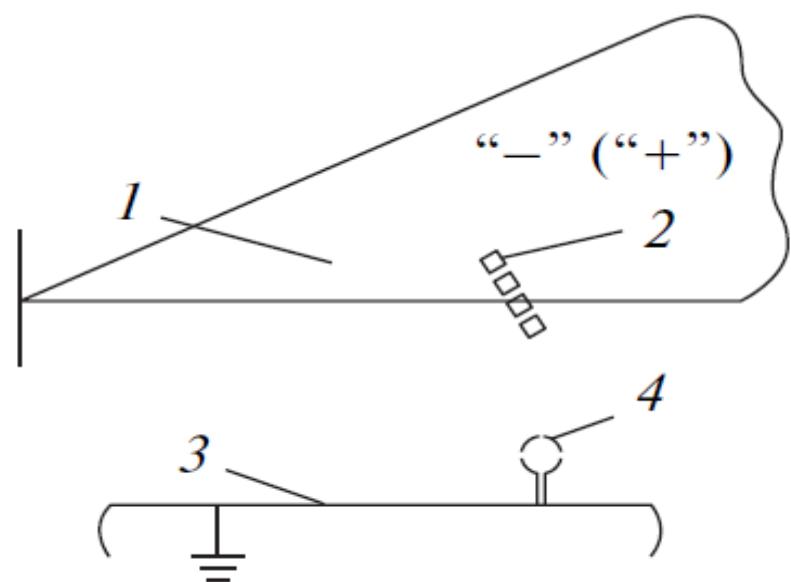


Рисунок 7 - Схема эксперимента на установке «Гроза»:  
1 - грозовая ячейка; 2 – группа модельных гидрометеоров; 3 – земля, 4 – стержневой электрод.



Рисунок 8 – Разрядный процесс в ходе эксперимента.

Выводы по 1-й главе:

В результате было изучена литература по теме образования заряженных аэрозольных облаков, механизмах и способах зарядки частиц. Устройствами, позволяющими создавать заряженные аэрозольные образования, являются электрогазодинамические генераторы, использующие коронный разряд в качестве способа зарядки частиц.

Описан экспериментальный комплекс «Гроза», способный создавать искусственные облака заряженного аэрозоля с предельной плотностью объёмного заряда, соответствующей грозовым облакам и обеспечивать возможность реализации различных типов электрических разрядов, характерных для грозовых облаков. В промежутке «облако заряженного аэрозоля - земля» обеспечивается сильное электрическое поле, в котором развиваются все характерные для грозы формы разрядов, в том числе и главная стадия разряда.

## Глава 2. АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОКА ГЛАВНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА ИЗ ИСКУССТВЕННОГО ГРОЗОВОГО ОБЛАКА ИЗ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ХОДЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 2.1. Получение характеристик тока главной стадии разряда из искусственного грозового облака из данных

#### 2.1.1. Программное обеспечение для получения данных

В ходе исследований разрядных процессов были получены экспериментальные данные, представляющие собой импульсы тока, зарегистрированные в форме осциллографов.

Импульс тока – это кратковременный всплеск тока в промежутке полезного сигнала. Импульс тока содержит такие параметры, как форму, амплитудное значение, длительность, частоту.

При проведении экспериментов сформировался обширный массив регистрируемых экспериментальных данных. Определение параметров импульсов тока вручную занимает большое количество времени. Для упрощения обработки результатов была использована созданная на кафедре ТЭВН в среде MATLAB программа AnalyzeResults. Эта программа позволяет осуществлять обработку сигналов, зарегистрированных осциллографом и сохранённых в виде файлов числовых данных.

Обрабатываемым объектом программы являются данные эксперимента (теста, опыта), представляющие собой осциллографы импульса тока, полученные в ходе разрядного эксперимента.

Программа AnalyzeResults позволяет определить следующие характеристики исследуемого сигнала:

- длительность импульса тока;
- суммарный перенесённый за это время заряд;
- время начала и конца отдельного импульса;

- время достижения кривой тока значений 0,1; 0,3 и 0,9 от амплитуды импульса, разностью которых определяется длительность фронта импульса на уровне 0,1-0,9 или 0,3-0,9;
- крутизны фронта на уровнях 0,1-0,9 ( $a_{0.1}$ ) или 0,3-0,9 ( $a_{0.3}$ ), определяемые как

$$a_{0.1} = \frac{I_{0.9} - I_{0.1}}{t_{0.9} - t_{0.1}} ;$$

$$a_{0.3} = \frac{I_{0.9} - I_{0.3}}{t_{0.9} - t_{0.3}} ;$$

- максимальную крутизну фронта;
- амплитуду тока импульса, А;
- перенесенный заряд.

Длительностью импульса тока является разница между временем завершения полезного сигнала и временем начала полезного сигнала данного импульса. В данной работе измеряется в наносекундах.

Перенесенным зарядом является количество заряда, перенесенного в результате разрядных процессов за длительность полезного сигнала. В данной работе измеряется в нанокулонах.

Крутизной фронта импульса определенного уровня является отношение между разностью тока на уровне 0,9 от амплитудного значения и х от амплитудного значения к разности времени, при котором ток достиг значения 0,9 от амплитуды и времени, при котором ток достиг х от амплитуды, где х – выбранный уровень. В данной работе измеряется в амперах, деленные на наносекунду, были выбраны уровни 0,1 и 0,3 от амплитудного значения тока импульса.

Амплитудное значение тока импульса – максимальное значение тока импульса на длительности полезного сигнала. Амплитудное значение находится как положительное, так и отрицательное для каждого импульса. В данной работе измеряется в амперах.

Запуск программы производится открытием файла «analyzeResults.m» в программной среде «MatLab». Для начала работы с программой «AnalyzeResults» необходимо в открытом окне с программой нажать кнопку «Run» на панели инструментов «MatLab». Для того, чтобы избежать ошибки при начале работы с программой, необходимо удостовериться, что версия «MatLab» на рабочем компьютере совпадает или выше, чем версия «MatLab», в которой было разработано последнее издание «AnalyzeResults».

При инициализации файла появится отдельное окно с интерфейсом программы, включающее в себя рабочую область и панель инструментов.

На рабочей области будут отображаться график осциллографа с нанесенными на нее временными характеристиками, вкладки «Обработка импульса», «Сигнал текущего канала», «Сигналы всех каналов» и инструменты для работы с масштабированием.

Панель инструментов, располагающаяся слева от графика осциллографа, включает в себя:

- Панель импорта данных теста и его описание под названием «Эксперименты, (опыты, тесты)»;
- Панель характеристик сигнала, выделенного на выбранном канале под названием «Каналы»;
- Панель определения характеристик импульса тока разряда под названием «Импульсы».
- Кнопку «Сохранить результаты обработки».

На ней располагается информация об обрабатываемом опыте эксперимента, осциллограф тока которого отображается в главном окне.

Кнопка «Открыть...» на панели «Эксперименты, (опыты, тесты)» вызывает окно выбора количества открываемых экспериментов. Далее, после выбора количества тестов, открывается окно для выбора папки, имя которой должно быть задано в формате ГГГГ\_ММ\_ЧЧ, где ГГГГ – год, ММ – месяц, ЧЧ – число, если была выбрана серия тестов. При выборе одного теста в названии папки

должен быть указан номер опыта в следующем виде «Test N \*\*», где \*\* – номер теста.

Под этой кнопкой располагается текст, в котором отображается название файла теста и название папки эксперимента, в которой файл находится.

Папка с опытом должна лежать в папке эксперимента, где в названии должен быть указан номер опыта в следующем виде «Test N \*\*», где \*\* – номер опыта.

Открытие папки с серией опытов обновит значения панели инструментов в разделе «Эксперименты (опыты, тесты)».

При установлении параметра «пред. обработка без запроса» осциллографма будет открываться с предыдущими результатами обработки автоматически.

Ниже располагается строка, в которой отображен порядковый номер теста из всех загруженных опытов и количество загруженных опытов. Стрелки, расположенные по краям строки, изменяют номер теста.

Под кнопкой расположены загруженные данные, отображающие дату опыта, номер опыта, описание теста.

Далее следует панель «Каналы (\* из 4)», где \* - выбранный из четырех доступных номер канала.

Для каждого канала ниже расположены параметры импульса тока – время начала импульса, время окончания импульса, длительность импульса, перенесенный за это время заряд.

Также, ниже располагается параметр «Источник сигнала», где в выпадающем окне можно выбрать один из источников – электрод, антenna, ФЭУ.

Панель «Эксперименты (опыты, тесты)» изображена на рисунке 9, эксперимент, открытый на главном окне программы, изображен на рисунке 10, а панель «Каналы» изображена на рисунке 11.

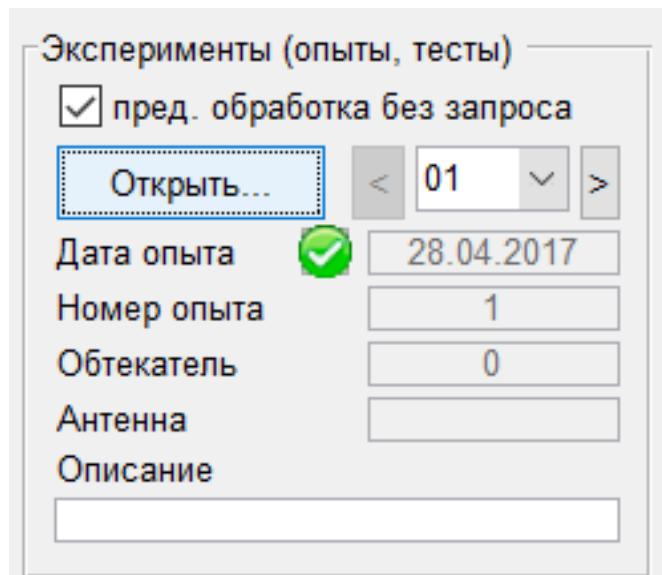


Рисунок 9 – Панель «Эксперименты (опыты, тесты)» при открытом эксперименте.

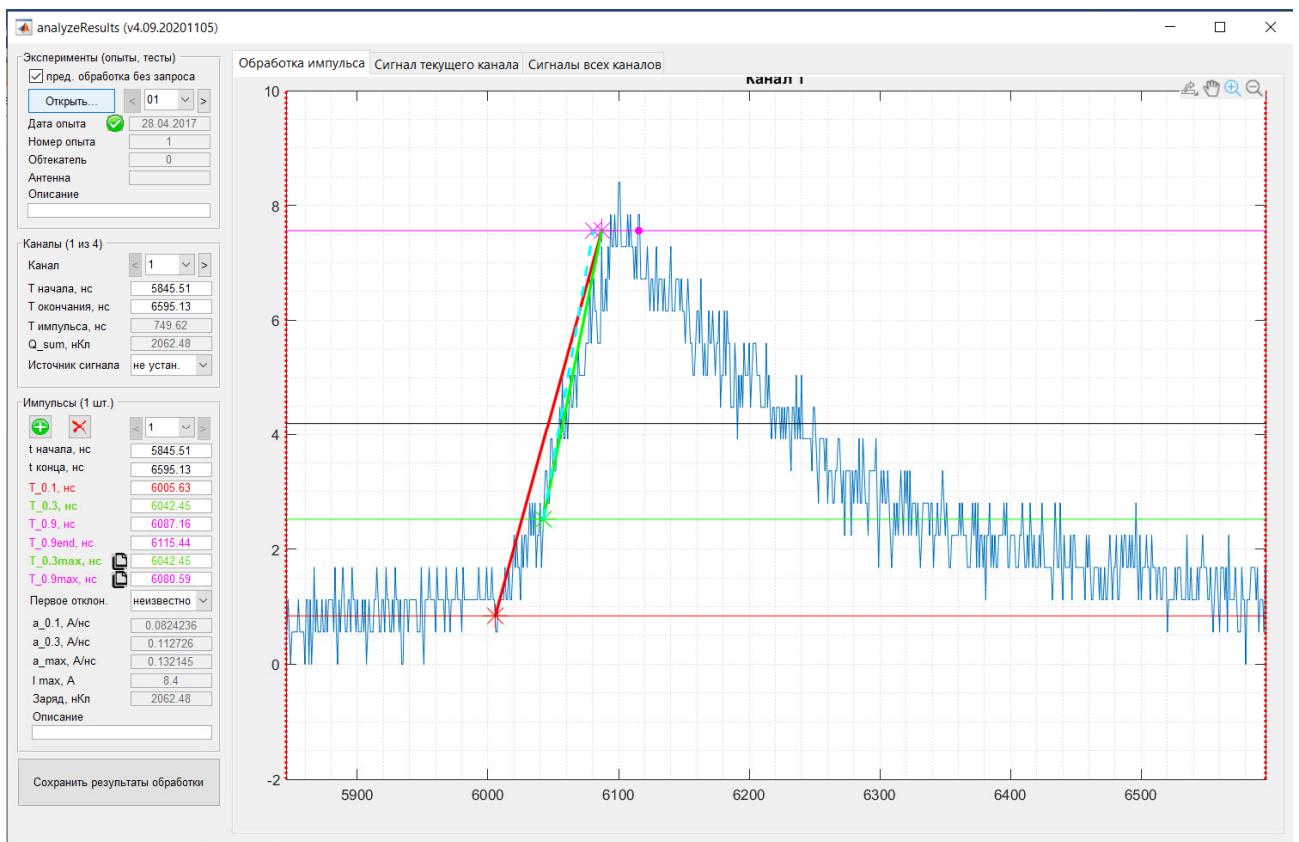


Рисунок 10 – Главное окно программы AnalyzeResults с открытой осциллограммой эксперимента.

Каналы (1 из 4)	
Канал	< 1 >
Т начала, нс	5845.51
Т окончания, нс	6595.13
Т импульса, нс	749.62
Q_sum, нКл	2062.48
Источник сигнала	не устан.

Рисунок 11 – Панель «Каналы» с данными обработки импульса.

На панели «Импульсы», изображенной на рисунке 12, показаны параметры импульса выбранного канала. В дополнение к параметрам импульса тока из панели «Каналы», здесь отображены такие параметры, как время достижения током величины  $0,1 * I_{max}$ , время достижения током величины  $0,3 * I_{max}$ , время достижения током величины  $0,9 * I_{max}$  в первый раз, время достижения током величины  $0,9 * I_{max}$  во второй раз, крутизны фронта импульса  $a_{0,1}$  и  $a_{0,3}$ , максимальная крутизна фронта, максимальный ток импульса, параметр «Первое отклон.», где в выпадающем окне можно выбрать значение «+», «-» или «неизвестно», описание импульса. При помощи кнопок «+» и «x» можно добавить и удалить импульсы.

Импульсы (1 шт.)	
<	1
t начала, нс	5845.51
t конца, нс	6595.13
T_0.1, нс	6005.63
T_0.3, нс	6042.45
T_0.9, нс	6087.16
T_0.9end, нс	6115.44
T_0.3max, нс	6042.45
T_0.9max, нс	6080.59
Первое отклон.	неизвестно
a_0.1, А/нс	0.0824236
a_0.3, А/нс	0.112726
a_max, А/нс	0.132145
I max, А	8.4
Заряд, нКл	2062.48
Описание	<input type="text"/>

Рисунок 12 – Панель «Импульсы» с данными обработки импульса.

Ниже располагается кнопка «Сохранить результаты обработки», при нажатии на которую можно провести сохранение результатов.

Вкладки «Обработка импульса», «Сигнал текущего канала» и «Сигналы всех каналов», расположенные сверху от графика импульса тока позволяют переключаться между текущим импульсом, сигналом текущего канала с выделенным диапазоном обработки и сигналами всех каналов, с выделенными диапазонами обработки.

Также, в правом верхнем углу главного окна программы при выбранной вкладке «Обработка импульсов» находятся инструменты, позволяющие

увеличить и уменьшить область графика, выбрать нужную область графика, а также экспортировать график в нужном формате.

Вкладки «Сигнал текущего канала» и «Сигналы всех каналов» изображены на рисунках 13 и 14.

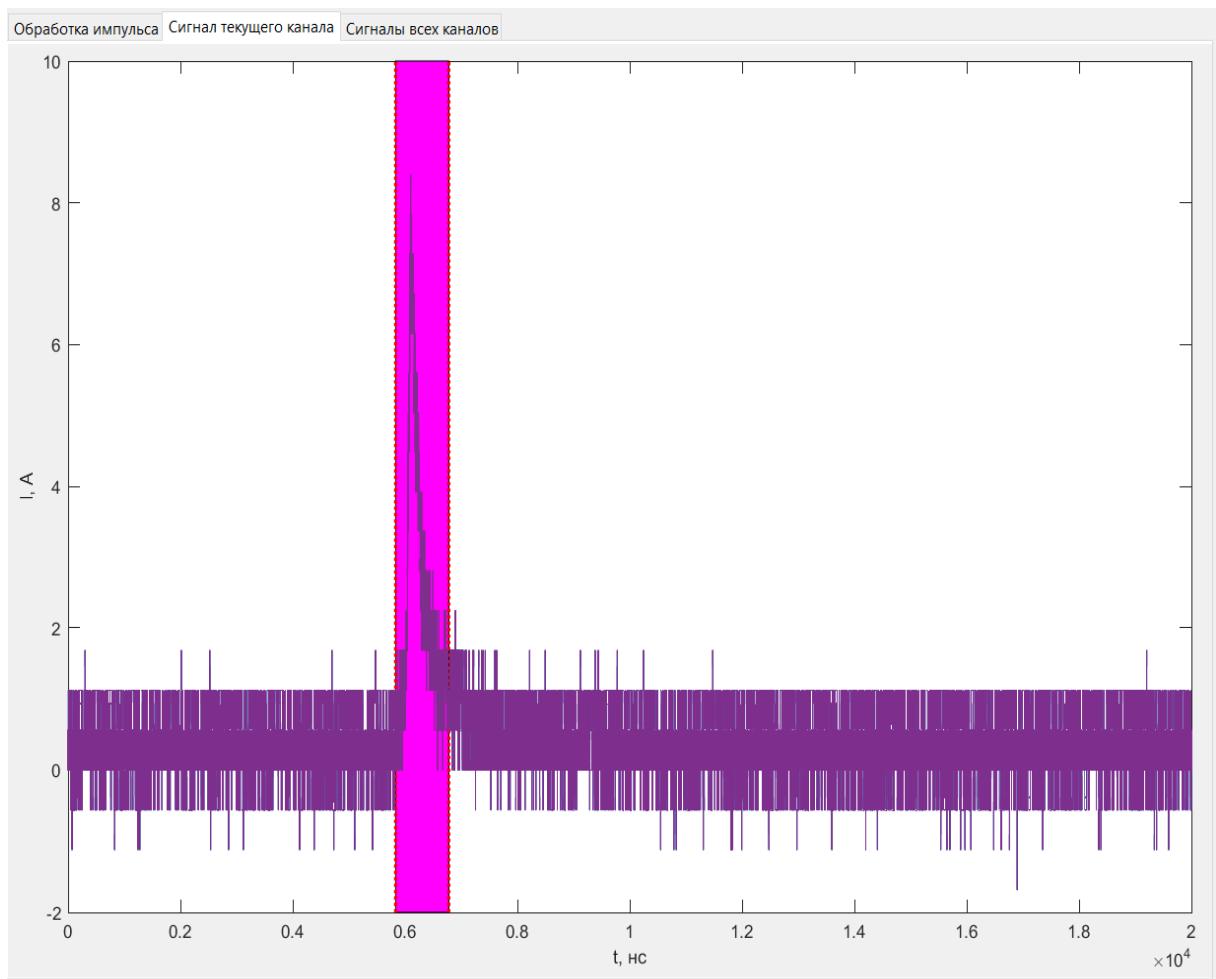


Рисунок 13 – Сигнал текущего канала.

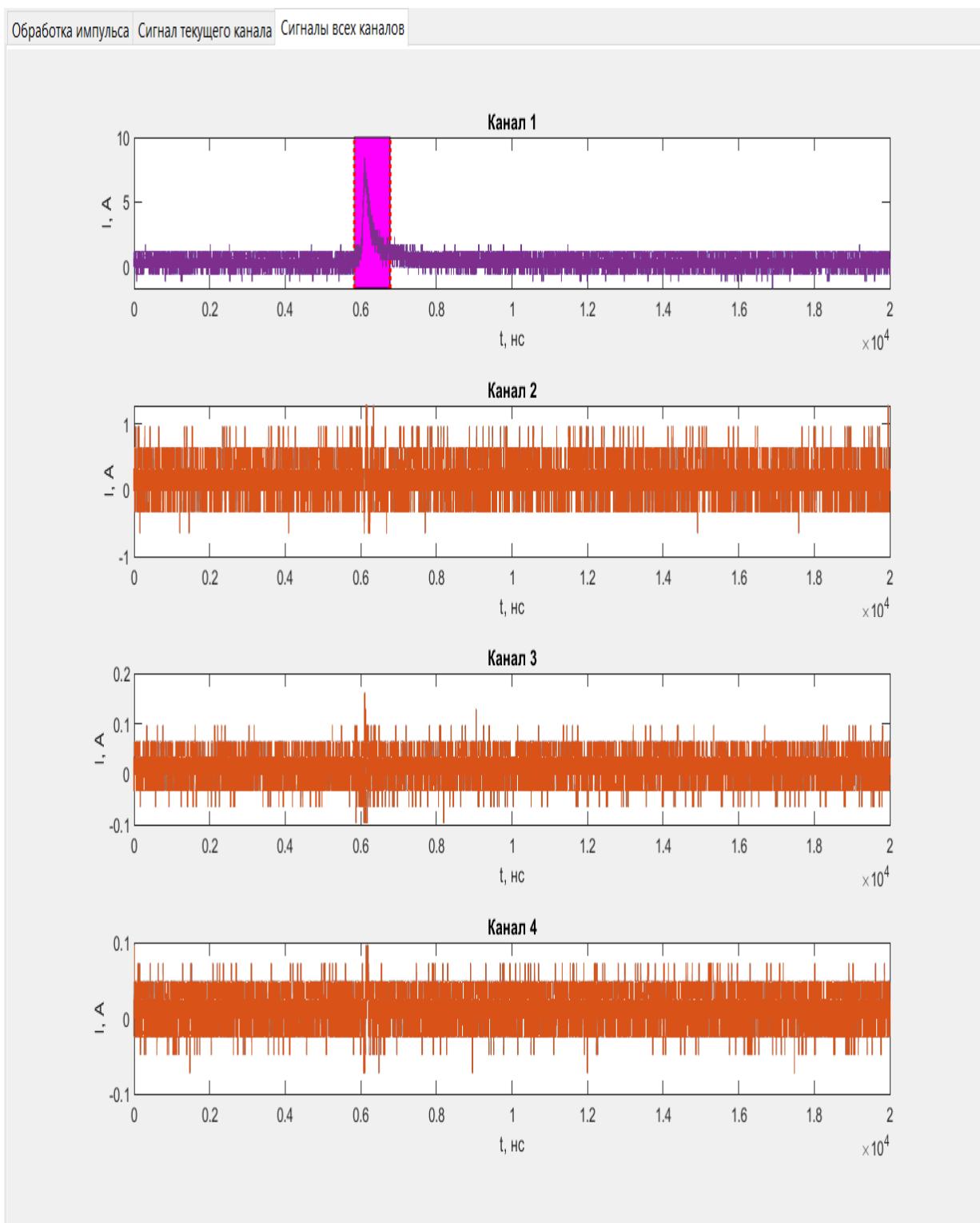


Рисунок 14 – Сигналы всех каналов.

### 2.1.2. Процесс обработки полученных данных

В ходе обработки данных полученных осциллографом требуется выделить ненулевую область сигнала полезного сигнала.

Полезным сигналом является временной отрезок осцилограммы, содержащий информацию об импульсе тока, то есть его начало, амплитудное значение и завершение.

Процесс обработки полученных в результате экспериментов осцилограмм происходит следующим образом:

- 1) На осцилограмме производится выделение ненулевой области полезного сигнала;
- 2) Выделение необходимой части импульса при помощи кнопки «+», что создаёт новый импульс;
- 3) Выделение необходимых временных характеристик на выбранном импульсе;
- 4) Сохранение полученных при вычислении программой результатов при помощи кнопки «Сохранить результаты обработки».

Для лучшего пояснения работы программы выберем осцилограмму эксперимента, содержащую несколько импульсов. Таковым является эксперимент № 5.

Открыв его, можно увидеть наличие двух импульсов на осцилограмме тока. Каждый из импульсов будет обработан отдельно. Открытая осцилограмма показана на рисунке 15.

Выберем область полезного сигнала всей осцилограммы, то есть содержащей первый и второй импульс и нажмем на кнопку «Новый импульс». Затем, после автоматического масштабирования, подкорректируем выбранную область так, чтобы она включала в себя только полезный сигнал, содержащий первый импульс. Выбор области полезного сигнала и его корректировка показаны на рисунках 16 и 17.

Красная линия на осцилограмме показывает значение тока, равное 0,1 от амплитудного, зеленая – 0,3 от амплитудного, черная – 0,5 от амплитудного, фиолетовая – 0,9 от амплитудного. Для нахождения крутизн  $a_{0.1}$ ,  $a_{0.3}$  и  $a_{max}$  на графике, для каждого из времен  $T_{0.1}$ ,  $T_{0.3}$ ,  $T_{0.9}$ ,  $T_{0.9\_end}$ ,  $T_{0.3\_max}$  и  $T_{0.9\_max}$  отметим

пересечение соответствующей цветовой линии и графика значения тока. Результаты данных действий показаны на рисунке 18.

После завершения обработки первого импульса, перейдем к обработке второго импульса, нажав на кнопку «Новый импульс», тем самым создав второй импульс. Повторим действия, описанные выше. Результат обработки второго импульса представлен на рисунке 19.

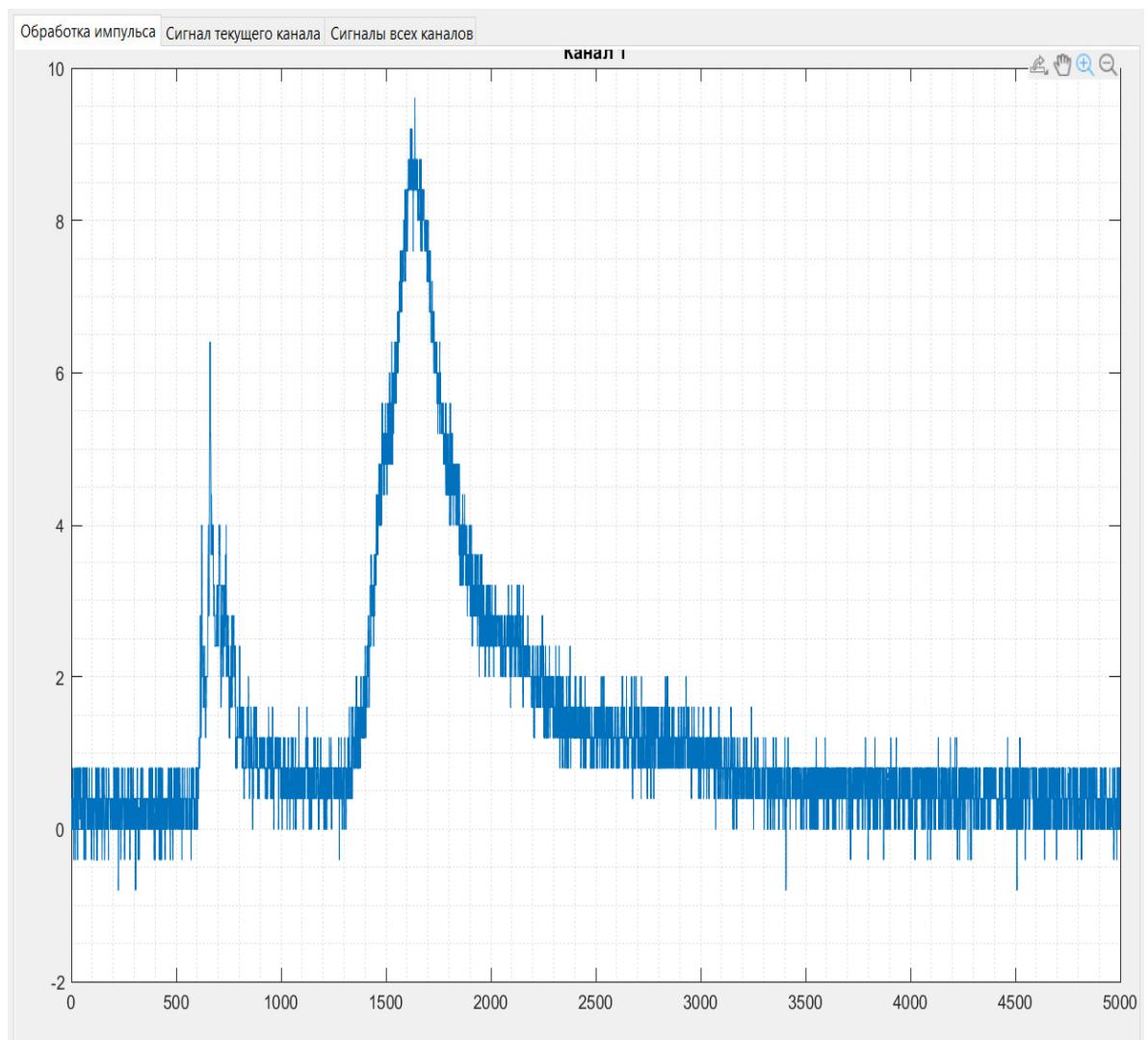


Рисунок 15 – Оциллографма тока эксперимента №5.

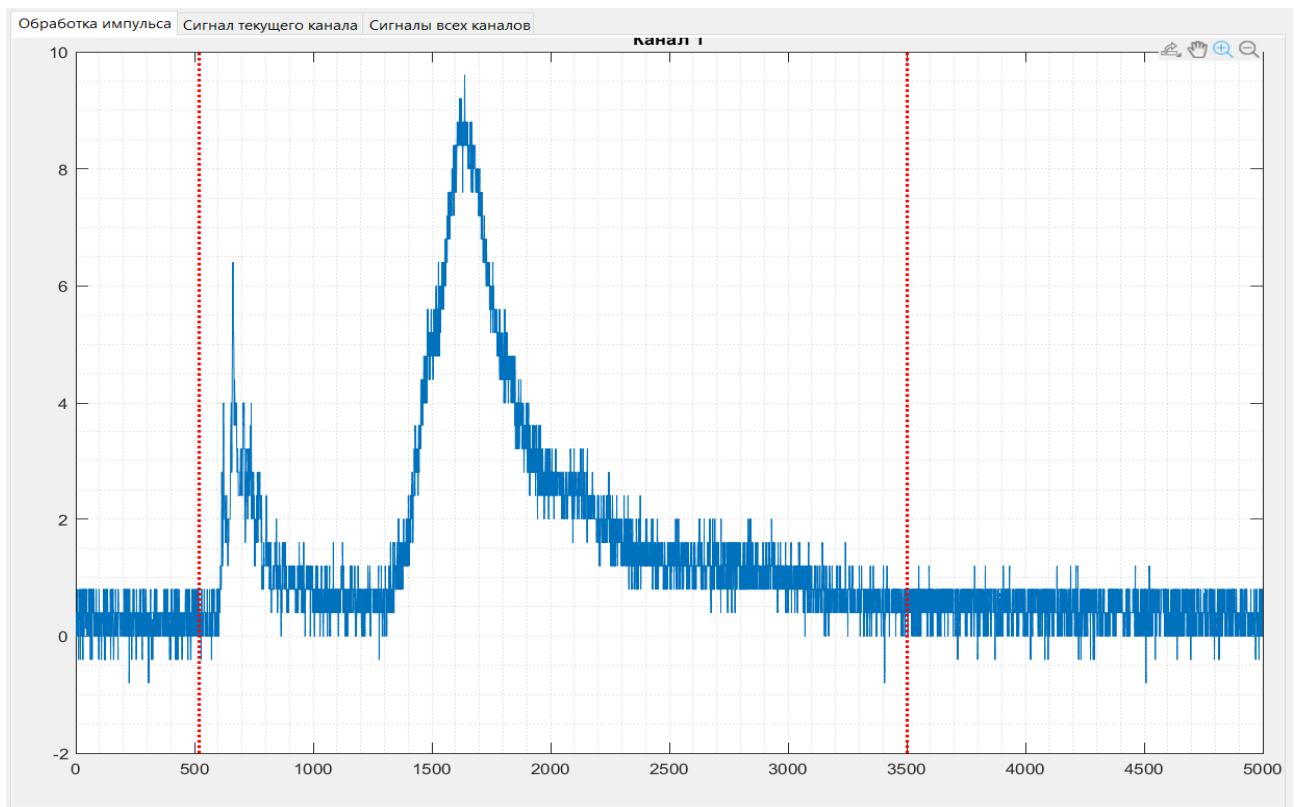


Рисунок 16 – Область полезного сигнала осциллографа тока эксперимента №5.

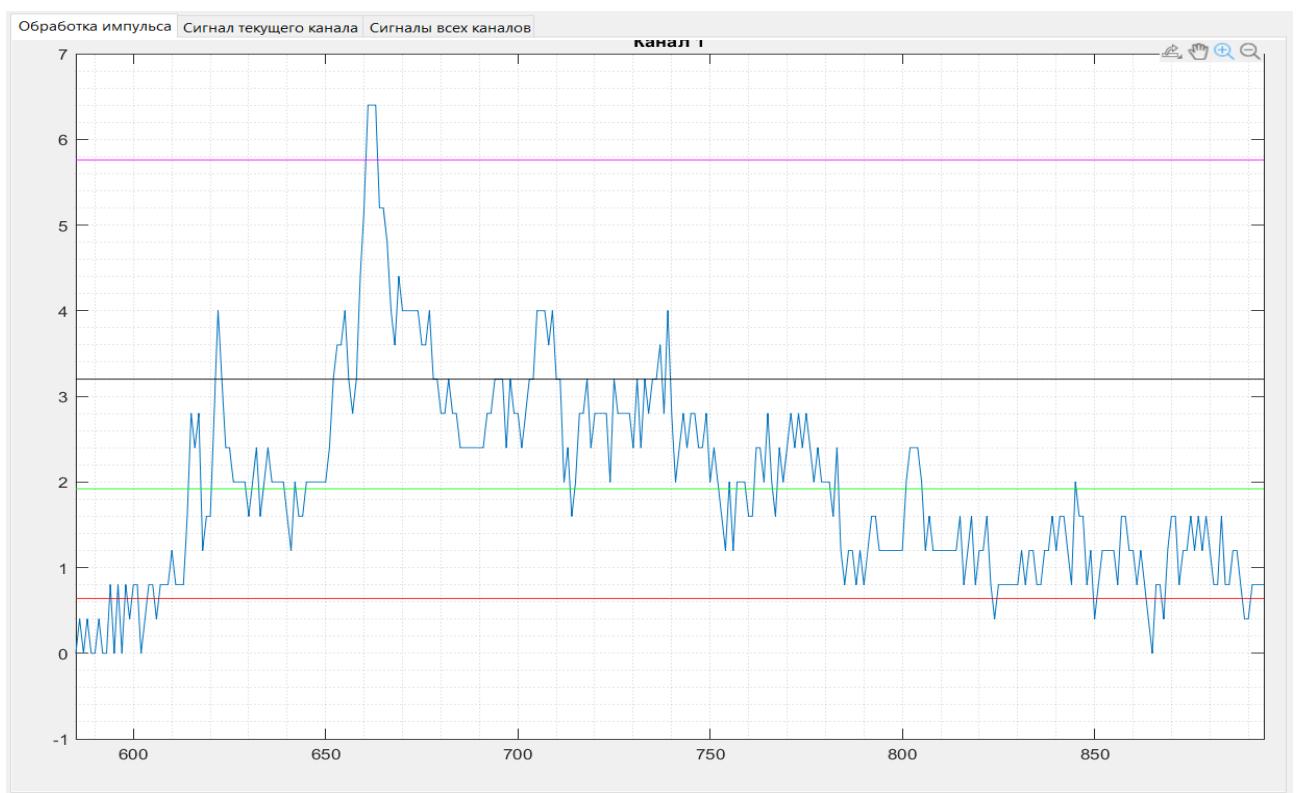


Рисунок 17 – Область полезного сигнала первого импульса эксперимента №5.

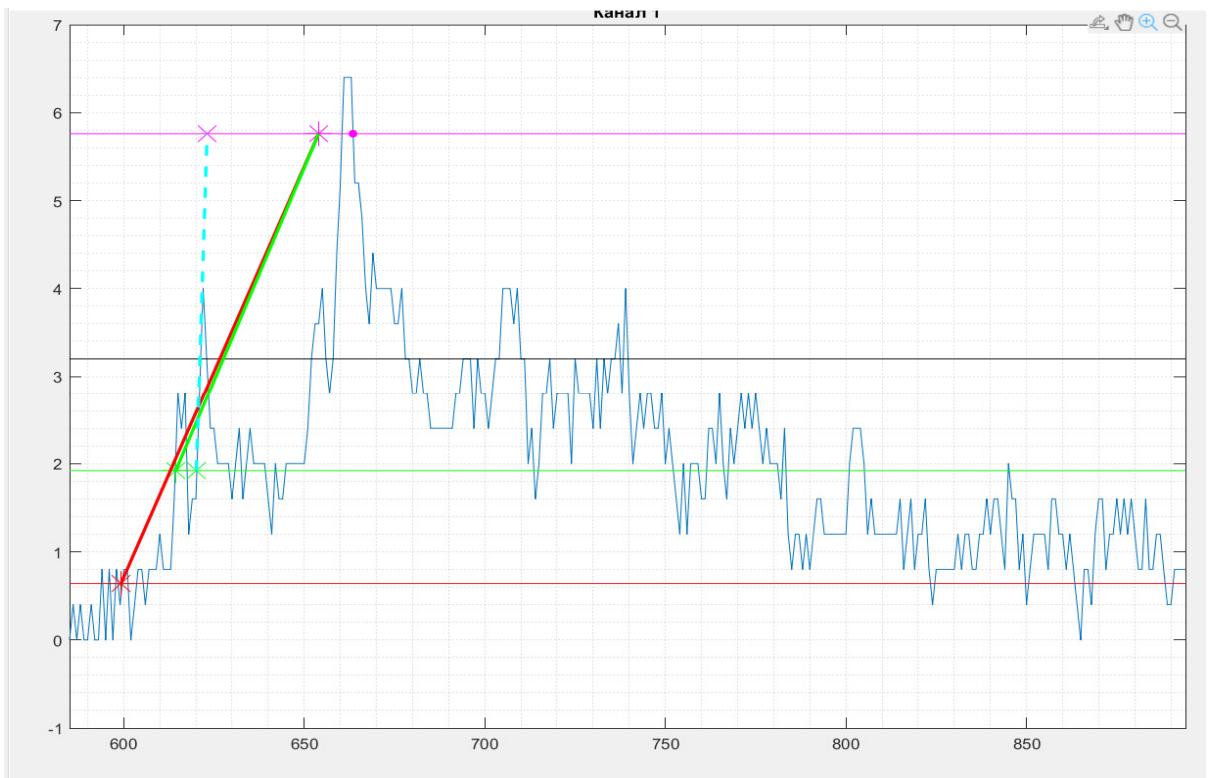


Рисунок 18 – Выделенные временные параметры первого импульса.

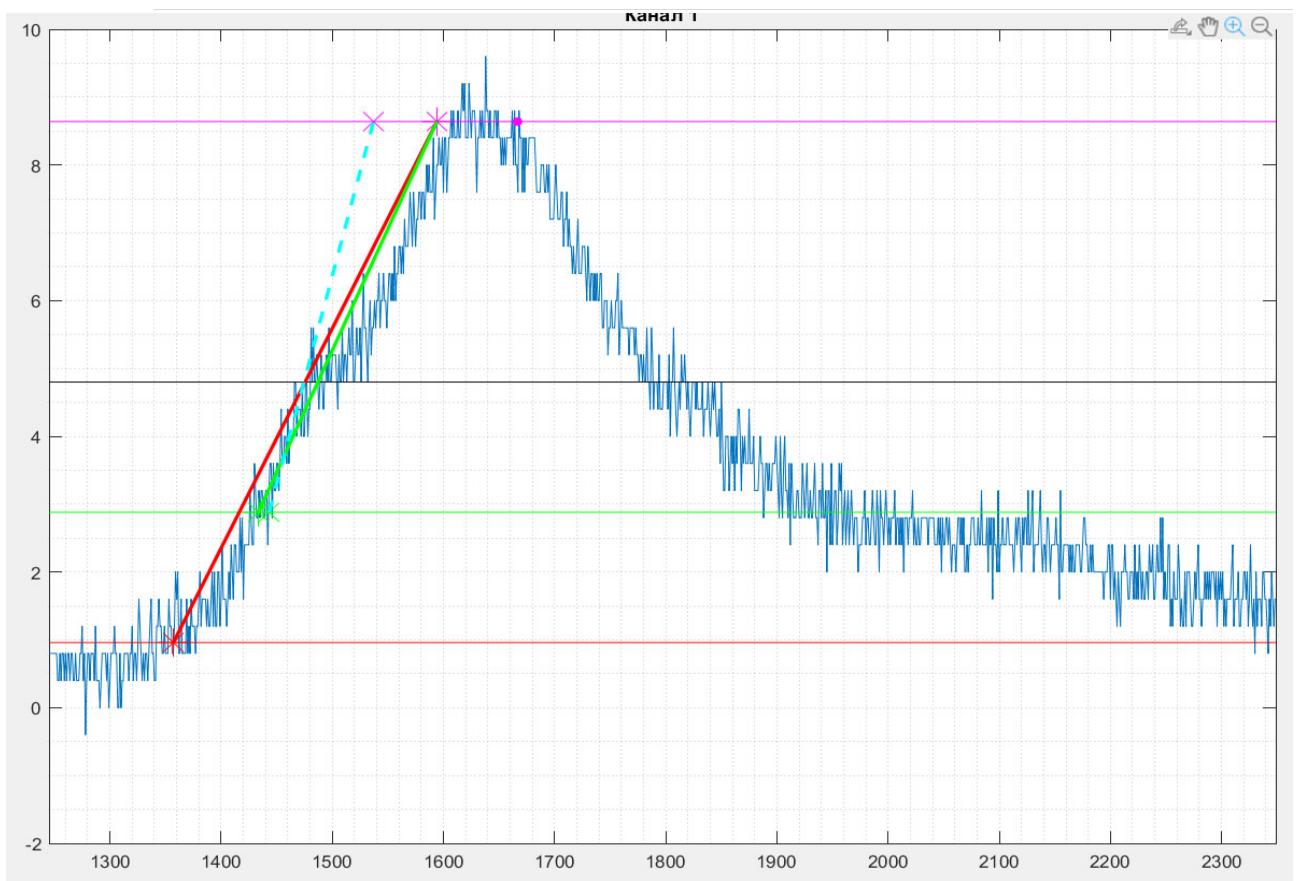


Рисунок 19 – Выделенные временные параметры второго импульса.

После этих действий нажмем на кнопку «Сохранить результаты обработки». При появлении окна с надписью «Запись результатов в файл окончена.» обработка сигнала завершена. Завершение обработки импульса показано на рисунке 20.

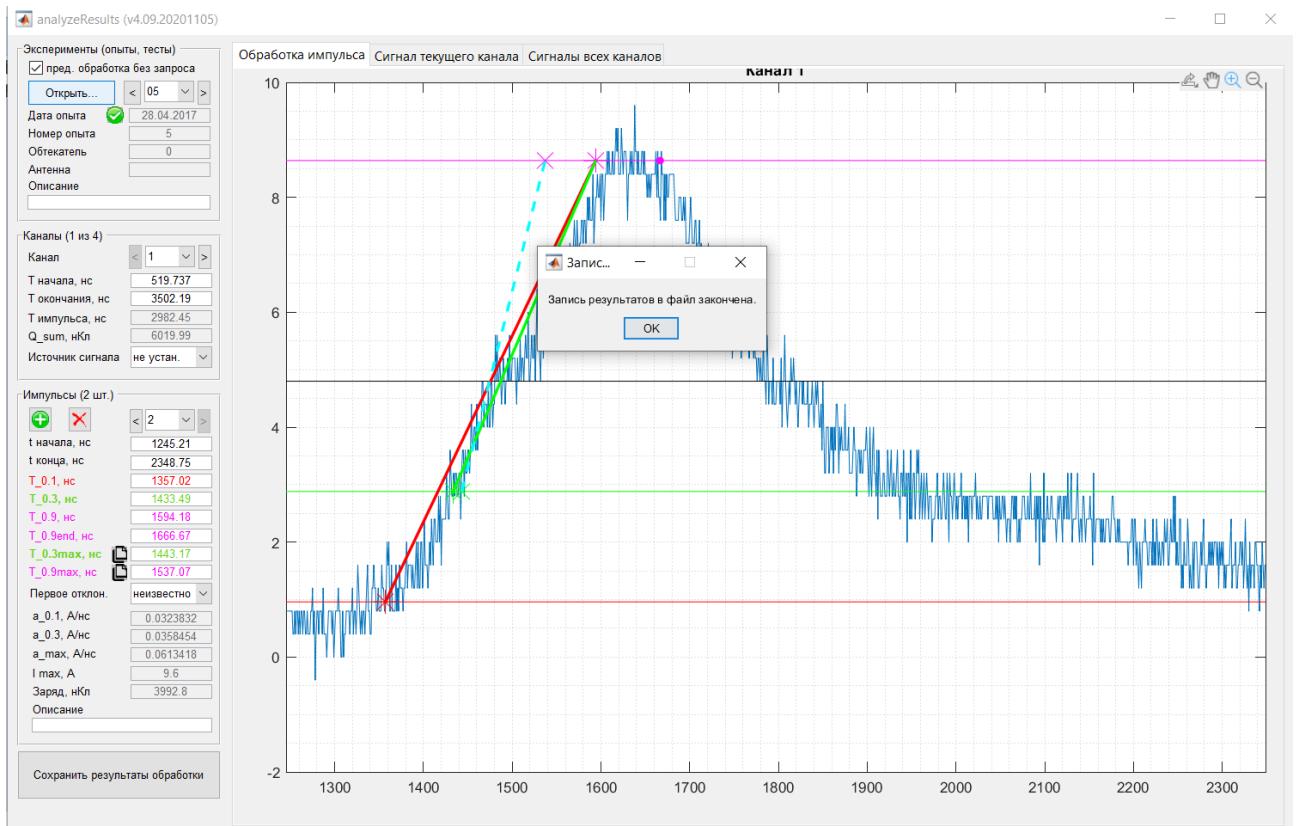


Рисунок 20 – Обработанный импульс.

В результате работы программы полученные данные сохраняются в файлах «results.mat», «results.xml», «results.png».

Файл «results.png» содержит в себе данные из вкладки «Сигналы всех каналов» для каждого отдельного теста.

Файл «results.mat» открывается при помощи программы MatLab и содержит в себе параметры импульса тока, полученные в ходе обработки программой AnalyzeResults осциллографом.

На рисунке 21 представлен открытый в программе MatLab файл «results.mat», содержащий параметры импульса тока.

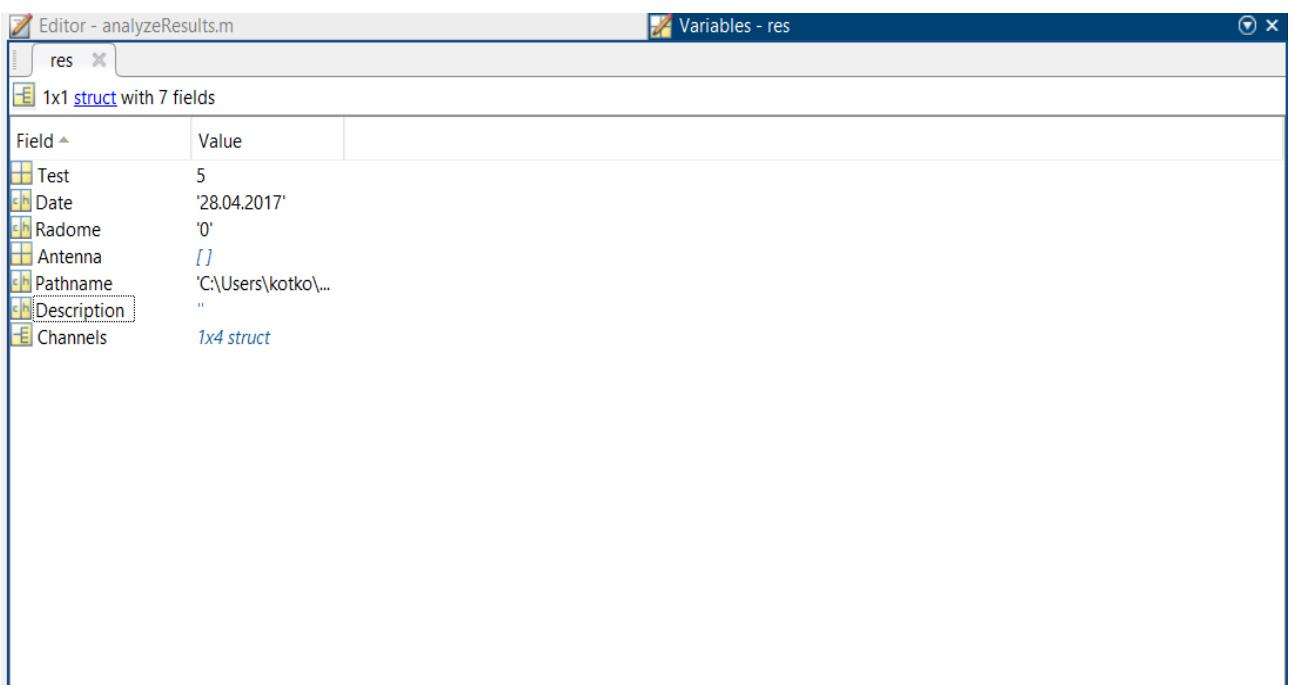


Рисунок 21 – редактор программы MatLab с открытым файлом «results.mat» при открытой вкладке «res».

После открытия файла, на экран будет выведен результат, представляющий собой структуру. Для того, чтобы получить необходимые данные о результатах обработки теста, нужно нажать на одну из ячеек в столбце «Field». Ячейка «Channels» содержит численные результаты обработки осцилограмм импульсов тока. Отдельно открытая ячейка «Channels» показана на рисунке 22.

Для перехода к результатам по обработке каждого из импульсов, необходимо нажать на ячейку, расположенную на пересечении строки с номером нужного канала и столбца «impulses». При открытии данной структуры на каждой из строк будут располагаться обработанные данные отдельных импульсов. Данная структура приведена на рисунке 23.

Editor - analyzeResults.m

Variables - res.Channels

res.Channels

Fields	filename	name	data	T_begin	T_finish	Qsum	Qsum_abs	impulses	sourceType
1	20170428_...	1	5000x2 dou...	519.7370	3.5022e+03	6.0200e+03	6.0240e+03	1x2 struct	'не устан.'
2	'20170428_...	2	5000x2 dou...	[]	[]	[]	[]	[]	[]
3	'20170428_...	3	5000x2 dou...	[]	[]	[]	[]	[]	[]
4	'20170428_...	4	5000x2 dou...	[]	[]	[]	[]	[]	[]
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									

Рисунок 22 – редактор программы MatLab с открытым файлом «results.mat» при открытой вкладке «res.Channels».

Editor - analyzeResults.m

Variables - res.Channels(1).impulses

res.Channels(1).impulses

Fields	Aminus	Aplus	Description	First_sign	Imax	Q	a_10	a_30	a_max	index_start	index_stc
1	2.0000e-06	6.4000	[]	[]	6.4000	607.3994	0.0836	0.0833	0.2442	587	81
2	0.4000	9.6000	[]	[]	9.6000	3.9944e+03	0.0273	0.0320	0.0363	1247	23
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											

Рисунок 23 – редактор программы MatLab с открытым файлом «results.mat» при открытой вкладке «res.Channels».

В результате работы программы AnalyzeResults для каждого импульса были получены параметры:

- Максимальный отрицательный ток ( $A_{minus}$ )
- Максимальный положительный ток ( $A_{plus}$ )
- Максимальный ток ( $I_{max}$ )
- Перенесенный заряд ( $Q$ )
- Крутизна фронта  $a_{0.1}$  ( $a\_10$ )
- Крутизна фронта  $a_{0.3}$  ( $a\_30$ )
- Крутизна фронта  $a_{max}$  ( $a\_max$ )
- Время начала импульса ( $t\_start$ )
- Время окончания импульса ( $t\_stop$ )

## 2.2. Выводы по 2-й главе

В результате была освоена программа AnalyzeResults, позволяющая анализировать и обрабатывать в автоматическом и полуавтоматическом режиме осциллографмы экспериментов. Был проведен обзор основного функционала программы, показан интерфейс, представлен алгоритм работы с полученными осциллографмами.

# Глава 3. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТОКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА МЕЖДУ ЗАРЯЖЕННЫМ ОБЛАКОМ И ЗЕМЛЕЙ ДЛЯ ИСКУССТВЕННЫХ ОБЛАКОВ РАЗЛИЧНОЙ ПОЛЯРНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ В ПРОМЕЖУТКЕ МОДЕЛЬНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОВ

## 3.1. Обработка исходных экспериментальных данных

В результате обработки программой AnalyzeResults осциллографм импульсов получилось 96 результатов с полезным сигналом, содержащих 1 импульс, 12 результатов с полезным сигналом, содержащих 2 импульса и 3 результата с полезным сигналом, содержащих 3 импульса.

Из-за малого количества результатов, содержащих 2 и 3 импульса невозможно получить их корректную статистическую обработку по отдельности.

Поэтому, будем из результатов, содержащих 2 и 3 импульса использовать один импульс с наибольшим значением тока, так как по форме и параметрам он схож с импульсами из тех результатов, где содержался один импульс.

В качестве основного инструмента для обработки статистических данных и их визуальной интерпретации будет использоваться программа Python 3 с необходимыми библиотеками.

По результатам эксперимента необходимо получить следующие данные главной стадии разряда:

- максимальный ток разряда положительной полярности;
- максимальный ток разряда отрицательной полярности;
- перенесенный заряд;
- длительность импульса;
- крутизна фронта на уровнях 0,1-0,9;
- крутизна фронта на уровнях 0,3-0,9;

- максимальная крутизна фронта;
- полярность разряда.

Результаты обработки экспериментов хранятся в папке с исходными данными в файлах форматов «\*.xml», «\*.mat», где \* - название эксперимента, включающее в себя его порядковый номер.

Напишем программу, которая будет из файла типа «\*.xml» считывать результаты и оформлять их в датасет.

Затем, по полученным данным оставим необходимые для обработки столбцы и добавим в строку с результатами каждого эксперимента значение полярности в соответствии с полярностью наибольшего значения тока разряда.

В конечном итоге, сохраним полученные данные в файл формата «xlsx» для дальнейшей обработки.

Код программы представлен в приложении А.

Ниже, в таблице 1 представлена часть результатов выполнения кода.

Таблица 1 – Значения параметров тока главной стадии разряда.

№ экс-та	$ I_{max+} $ , А	$ I_{max-} $ , А	$ Q_{пер} $ , нКл	$T_{имп}$ , нс	$a_{max}$ , А/нс	$a_{0,1}$ , А/нс	$a_{0,3}$ , А/нс	Полярность
1	8,4	0	2062,48	749,62	0,13	0,08	0,11	Полож.
2	10,8	0	1365,6	423,18	1,55	0,2	0,75	Полож.
...	...	...	...	...	...	...	...	...
51	26,4	0	3541,2	449,64	0,63	0,33	0,51	Полож.
52	30,4	0	3332,8	443,63	1,36	0,85	1,36	Полож.
53	0	22,4	7008,8	721,28	0,28	0,19	0,21	Отриц.
54	0	39,2	9629,2	556,36	1,4	0,58	0,61	Отриц.
...	...	...	...	...	...	...	...	...
110	0	28	7574,8	655,4	0,71	0,33	0,42	Отриц.
111	0	42,4	10216	602,6	0,84	0,32	0,6	Отриц.

### 3.2. Проверка корректности данных

Далее, необходимо проверить, являются ли полученные данные достоверными. Для этого, выясним наличие выбросов, построив гистограмму распределения максимального тока разряда для положительной и отрицательной полярности, а также длительности разряда.

Также, немаловажной характеристикой статистического распределения будет являться приближенность распределения данных к нормальному.

Код программы представлен в приложении А.

Результаты обработки данных представлены на рисунках 24, 25, 26, 27.

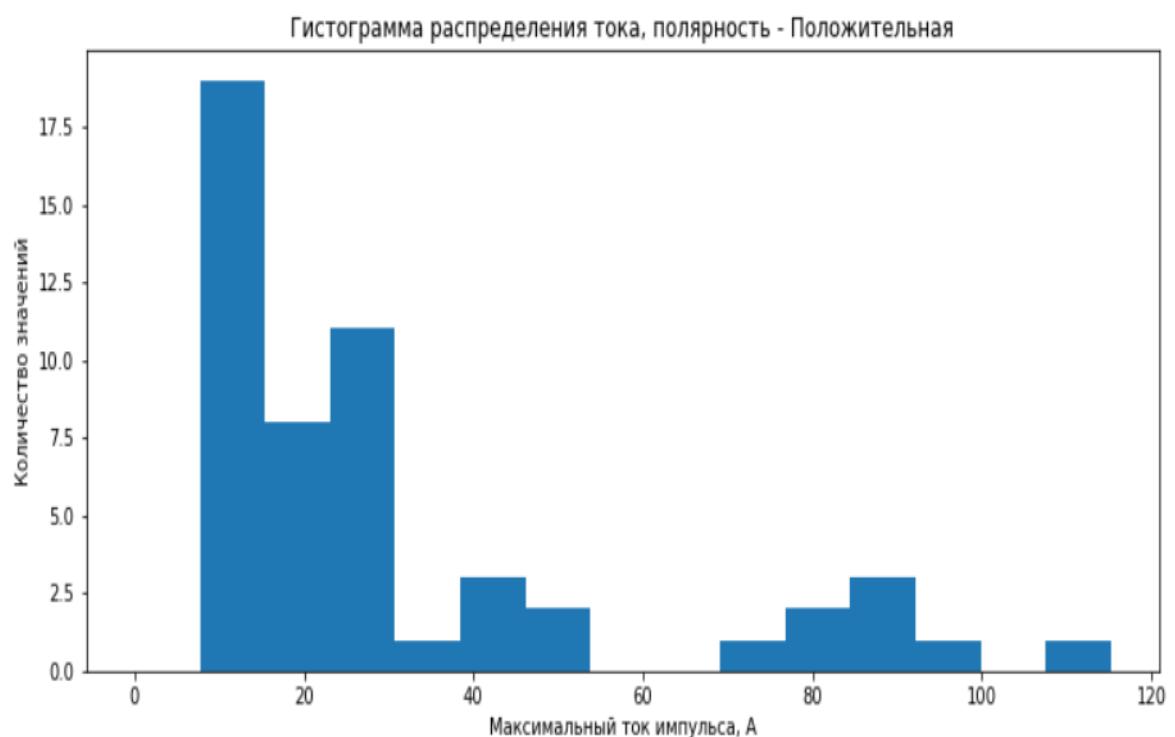


Рисунок 24 – Гистограмма распределения тока импульса положительной полярности.

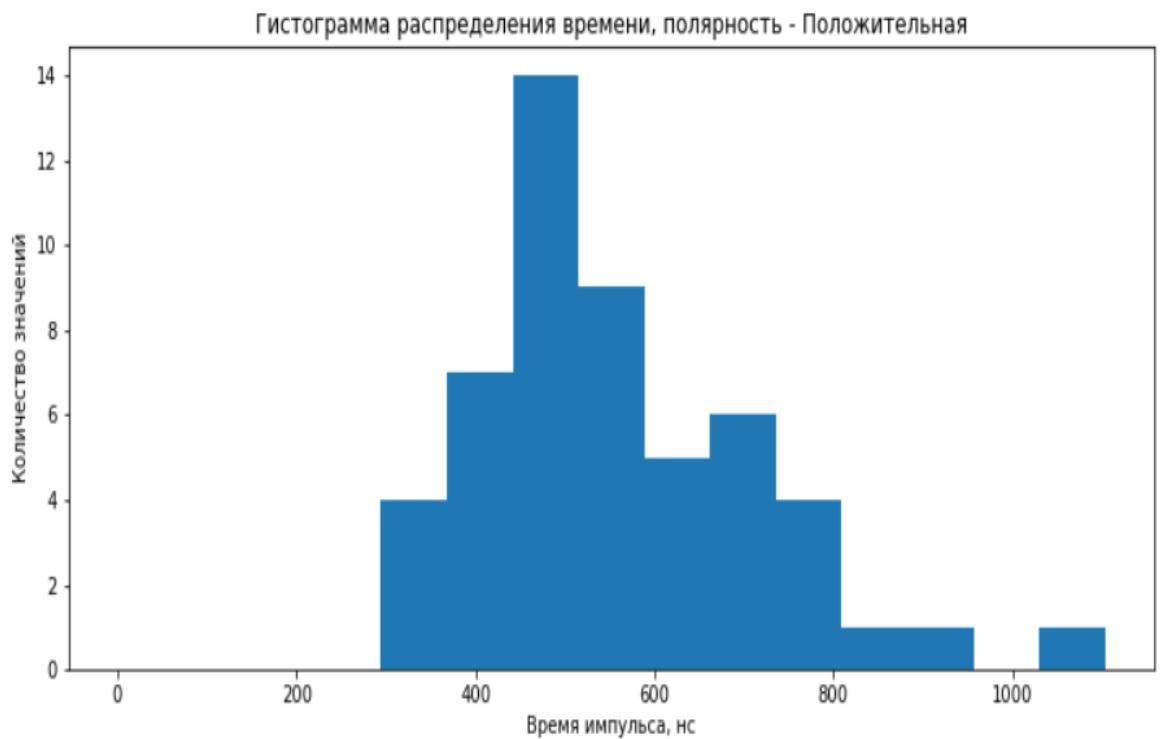


Рисунок 25 – Гистограмма распределения времени импульса положительной полярности.

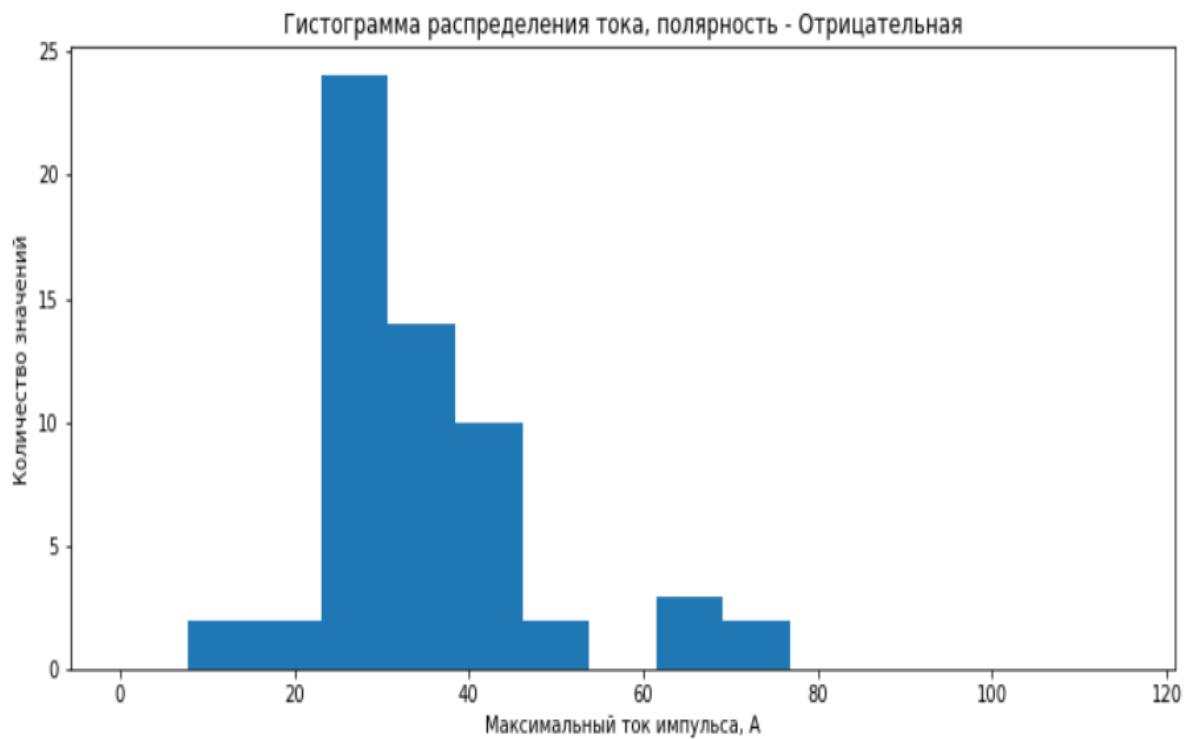


Рисунок 26 – Гистограмма распределения тока импульса отрицательной полярности.

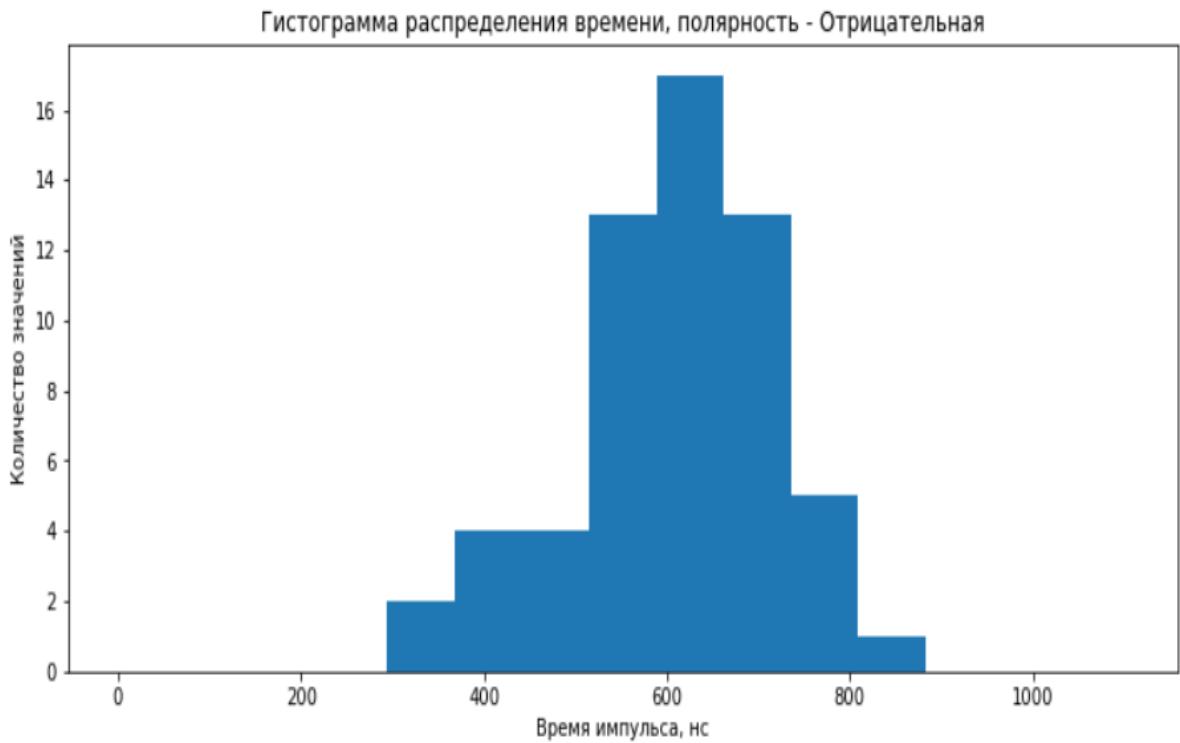


Рисунок 27 – Гистограмма распределения времени импульса отрицательной полярности.

Из полученных гистограмм видно, что выбросы данных отсутствуют, максимальные токи и длительности импульсов положительной и отрицательной полярности находятся в одинаковых интервалах значений, а распределения максимальных токов и длительности импульса близки к нормальному. Следует, что данные являются корректными и подлежат дальнейшей обработке.

### 3.3. Статистическая обработка подготовленных данных

Для получения необходимых результатов следует отдельно рассмотреть параметры главного разряда положительной и отрицательной полярности, найти их минимальные, средние, квартильные и максимальные значения, построить графики и выявить разницу полученных значений между полярностями.

Квартиль – значение, ниже которого лежит часть выборки или распределения вероятностей случайной величины, кратная одной четвертой.

Существуют 0,25-ый (25%) квартиль, 0,5-ый (50%) квартиль, 0,75-ый (75%) квартиль. 0,5-ый квартиль является медианой.

Код программы представлен в приложении А.

Результаты, полученные в ходе выполнения программы были сохранены в форматеxlsx и представлены в таблице 2 для положительной полярности и таблице 3 для отрицательной.

Таблица 2 – статистические значения параметров главной стадии разряда положительной полярности.

	$ I_{max+} $ , А	$ I_{max-} $ , А	$ Q_{пер} $ , нКл	$T_{имп}$ , нс	$a_{max}$ , А/нс	$a_{0.1}$ , А/нс	$a_{0.3}$ , А/нс
Среднее значение	32,09	0,14	5634,96	673,45	1,91	0,48	0,92
Ср.кв. отклонение	27,12	0,3	5088,76	211,69	2,13	0,43	1,22
Минимум	8,4	0	1003,8	357,92	0,1	0,03	0,04
25% квартиль	13,38	0	2301,52	556,23	0,41	0,15	0,18
50% квартиль	22,2	0	3215,4	637,76	1,07	0,28	0,44
75% квартиль	33,3	0	8865,85	744,26	2,88	0,79	1,16
Максимум	115,2	1,28	20203,2	1567,81	8	1,54	6,11

Исходя из среднего значения, во время импульса главной стадии разряда при положительно заряженном облаке переносится около 5634,96 нКл, а средний ток составляет 32,09 А при том, что минимальное и максимальное значение переносимого заряда равны 1003,8 нКл и 20203,2 нКл соответственно, а минимальное и максимальное значение тока импульса равны 8,4 А и 115,2 А

соответственно. Средняя продолжительность положительного импульса составляет 673,45 нс, а медианная - 637,76 нс. При положительной полярности облака средние значения  $a_{0.1}$  и  $a_{0.3}$  равны 0,48 А/нс и 0,92 А/нс соответственно, что говорит о том, что от времени  $t_{0.1}$  равное  $0,1 * t_{\text{общ}}$  до  $t_{0.3}$  равное  $0,3 * t_{\text{общ}}$  скорость возрастания тока молнии увеличивается в среднем в 1,916 раз. Среднее максимальное значение крутизны фронта равно 1,91 А/нс. Оно отличается от значения  $a_{0.3}$ , превосходя его в среднем более чем в два раза.

Таблица 3 – статистические значения параметров главной стадии разряда отрицательной полярности.

	$ I_{max+} $ , А	$ I_{max-} $ , А	$ Q_{\text{пер}} $ , нКл	$T_{\text{имп.}}$ , нс	$a_{max}$ , А/нс	$a_{0.1}$ , А/нс	$a_{0.3}$ , А/нс
Среднее значение	0,39	35,12	8787,42	609,49	0,96	0,4	0,54
Ср.кв. отклонение	0,52	12,52	1924,96	114,21	0,67	0,3	0,47
Минимум	0	11,2	3048,8	362,1	0,08	0,07	0,08
25% квартиль	0	28,4	8054,8	555,98	0,62	0,26	0,34
50% квартиль	0	31,2	8761,6	624,2	0,84	0,35	0,43
75% квартиль	0,8	39,2	9732,6	693,08	1,1	0,45	0,55
Максимум	1,6	76	13086,4	842,5	4,27	2,11	3,27

Во время импульса главной стадии разряда при отрицательно заряженном облаке переносится в среднем около 8787,42 нКл, а средний ток составляет 35,12 А при том, что минимальное и максимальное значение переносимого заряда

равны 3048,8 нКл и 13086,4 нКл соответственно, а минимальное и максимальное значение тока импульса равны 11,2 А и 76 А соответственно. Средняя продолжительность отрицательного импульса составляет 609,49 нс, а медианная - 624,2 нс. При отрицательной полярности облака средние значения  $a_{0.1}$  и  $a_{0.3}$  равны 0,4 А/нс и 0,54 А/нс соответственно, что говорит о том, что от времени  $t_{0.1}$  равное  $0,1 * t_{\text{общ}}$  до  $t_{0.3}$  равное  $0,3 * t_{\text{общ}}$  скорость возрастания тока молнии увеличивается в среднем в 1,35 раз. Максимальное значение крутизны фронта равно 0,96 А/нс. Оно отличается от значения  $a_{0.3}$ , превосходя его в среднем в 1,77 раз.

### 3.4. Графическое представление обработанных данных.

Для наилучшей интерпретации данных эксперимента необходимо построить:

- сравнительные гистограммы распределения максимальных токов импульса при положительной и отрицательной полярности;
- сравнительные гистограммы распределения длительности импульса при положительной и отрицательной полярности;
- сравнительные гистограммы распределения перенесенного заряда при положительной и отрицательной полярности;
- точечные диаграммы распределения максимальных токов при положительной и отрицательной полярности в зависимости от крутизны;
- бокс-плоты максимальных токов импульса при положительной и отрицательной полярности.

Гистограммы распределения максимальных токов импульса и длительности импульса при положительной и отрицательной полярности были построены в пункте 3.2 и представлены на рисунках 24, 25, 26, 27.

Результаты выполнения программы представлены на рисунках 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36.

Исходя из полученных графиков максимального тока импульса при положительной и отрицательной полярности, в среднем, значение тока при отрицательной полярности больше, чем при положительной. Однако, при положительной полярности искусственного заряженного аэрозоля существует небольшое количество значений тока, существенно превосходящих максимальные токи при отрицательной полярности.

Как видно из полученных гистограмм длительности импульса при положительной и отрицательной полярности, характер распределения длительности импульсов для положительной и отрицательной полярности можно считать приблизительно одинаковыми. В среднем, длительность импульса при отрицательной полярности несколько больше, чем при положительной, однако при положительной полярности импульса наблюдается больший разброс длительностей и существует один довольно длительный, по сравнению с остальными, импульс.

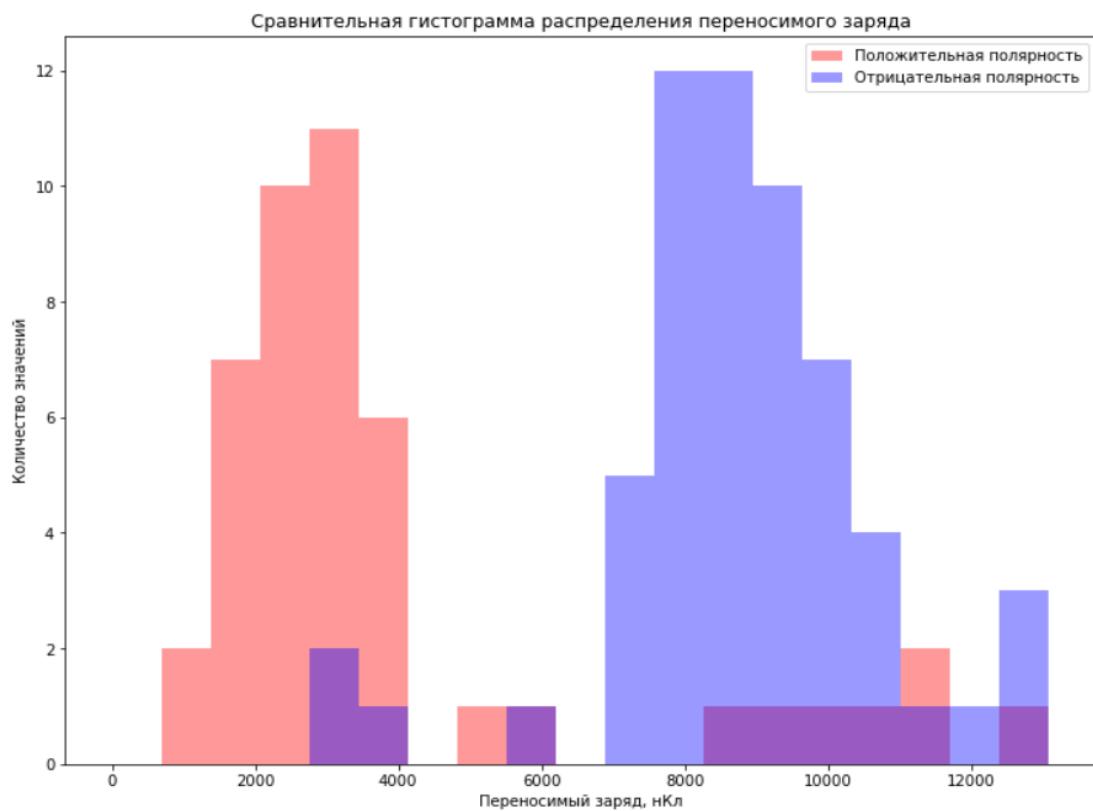


Рисунок 28 – Сравнительная гистограмма распределения перенесенного заряда.

Существует отчетливый сдвиг между распределениями переносимого заряда при положительной и отрицательной полярности. Распределение переносимого заряда при отрицательной полярности близко к нормальному, при положительной полярности, из-за небольшого количества токов, превосходящих максимальные токи при отрицательной полярности, имеется небольшое растяжение графика распределения переносимого заряда вправо.

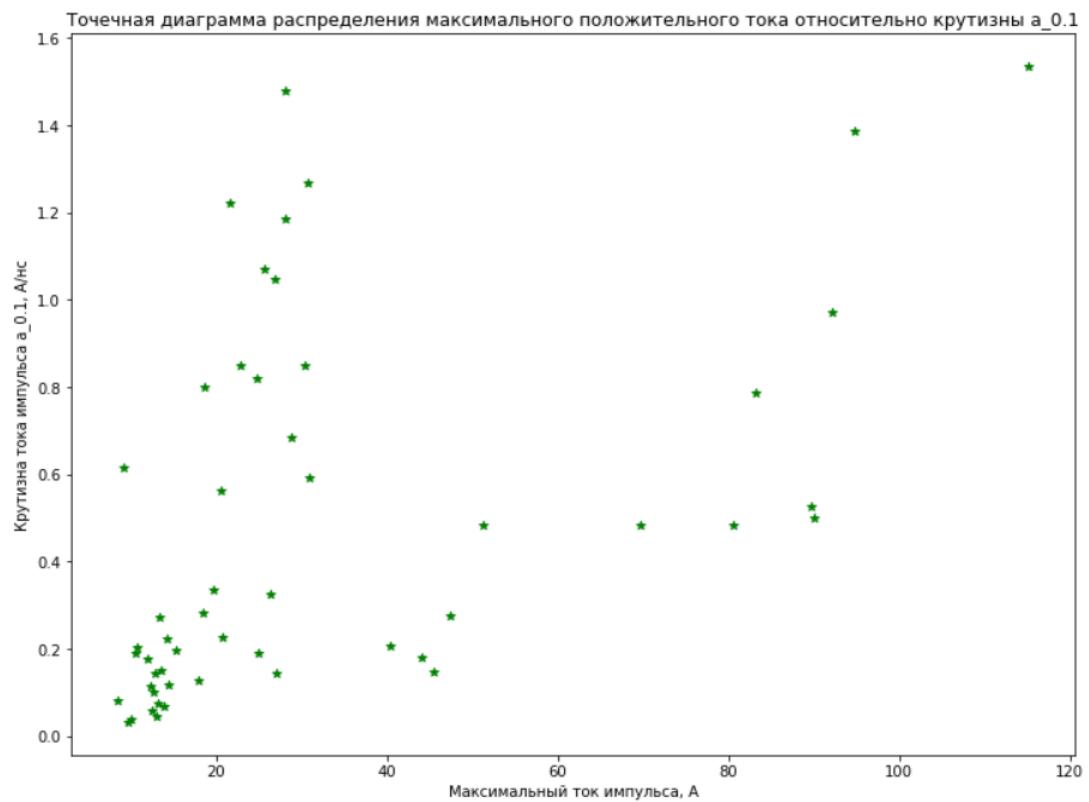
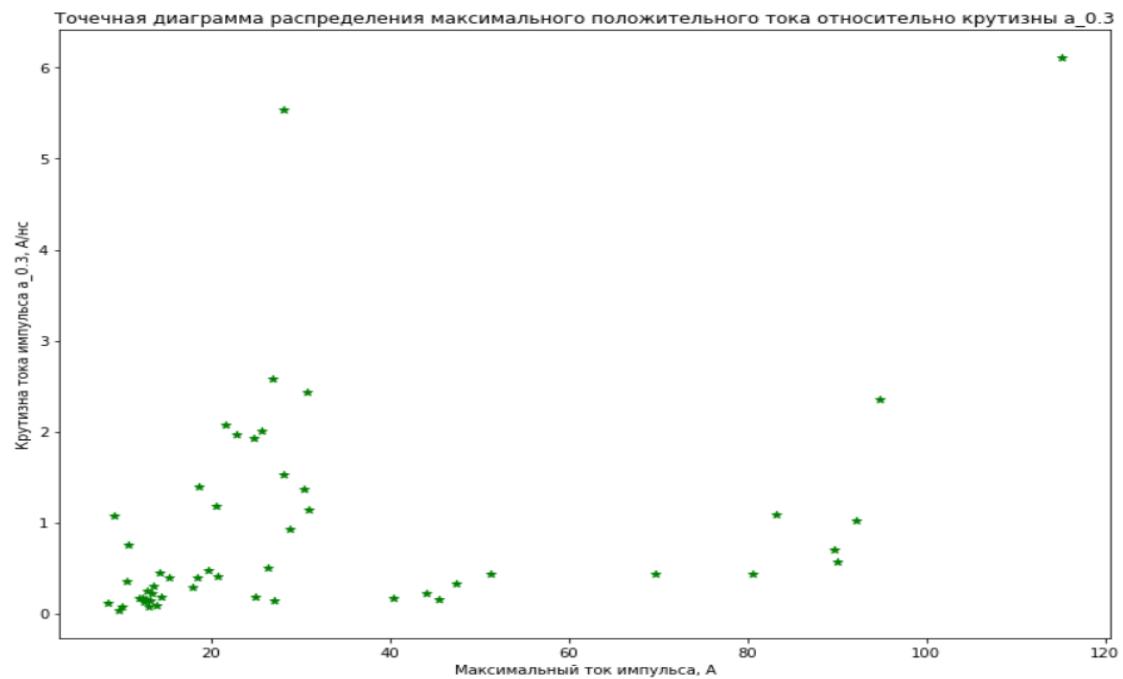


Рисунок 29 – Точечная диаграмма распределения максимального положительного тока импульса относительно крутизны  $a_{0.1}$ .



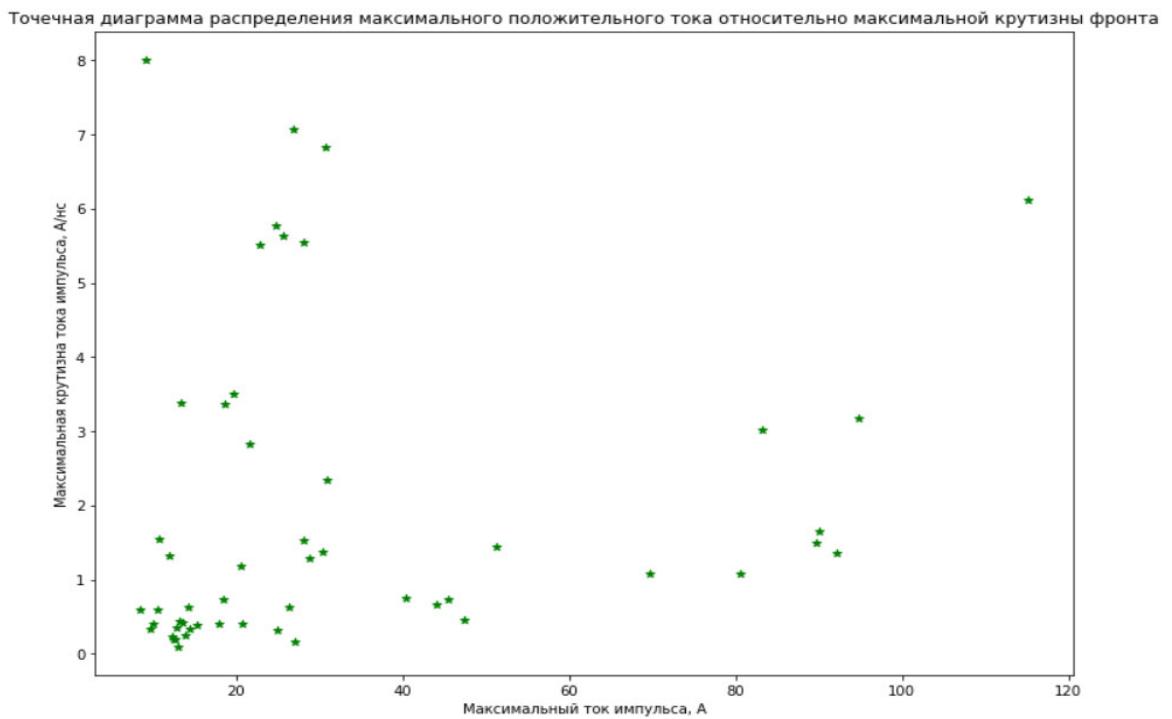


Рисунок 31 – Точечная диаграмма распределения максимального положительного тока импульса относительно  $a_{max}$ .

Как видно из полученных точечных диаграмм зависимостей крутизны фронта от максимального тока импульса положительной полярности, распределение стремится к квадратичному, причем, на графиках присутствуют две ветви. На всех графиках существует скопление при приближении к началу координат. По данным графикам можно сделать вывод, что корреляция между максимальным током импульса положительной полярности и крутизной фронта импульса отсутствует.

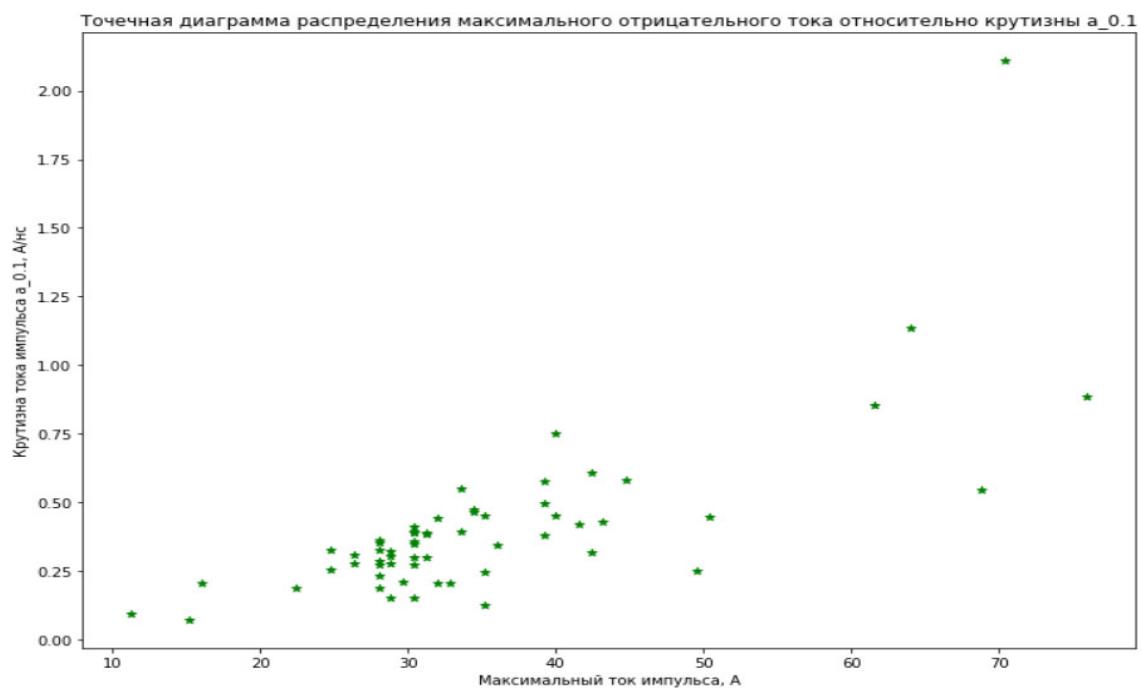


Рисунок 32 – Точечная диаграмма распределения максимального отрицательного тока импульса относительно крутизны  $a_{0.1}$ .

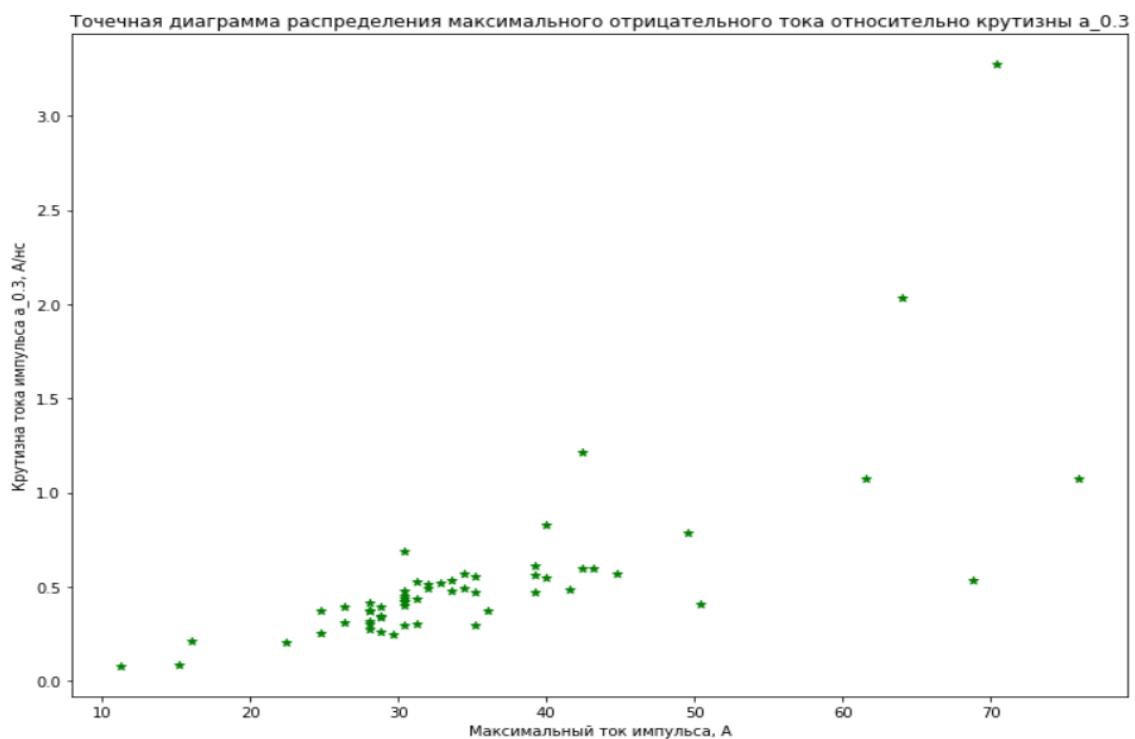


Рисунок 33 – Точечная диаграмма распределения максимального отрицательного тока импульса относительно крутизны  $a_{0.3}$ .

Точечная диаграмма распределения максимального отрицательного тока относительно максимальной крутизны фронта

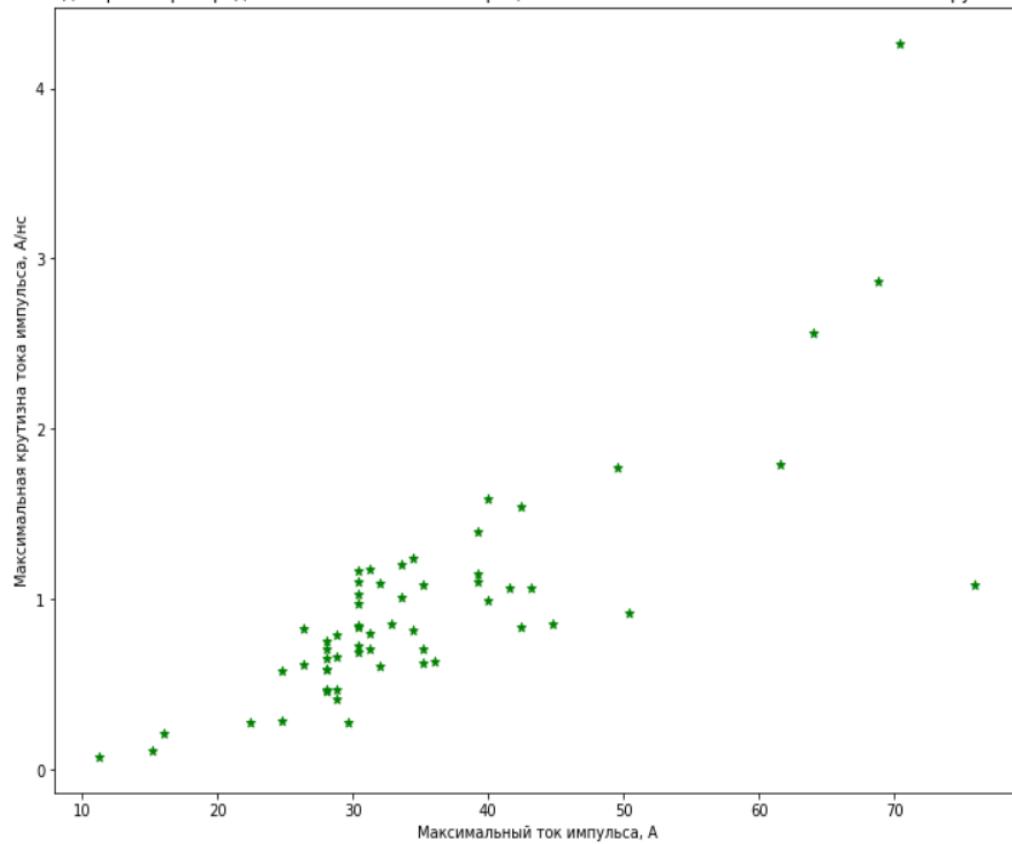


Рисунок 34 – Точечная диаграмма распределения максимального отрицательного тока импульса относительно  $a_{max}$ .

Как видно из полученных точечных диаграмм зависимостей крутизны фронта от максимального тока импульса отрицательной полярности, распределение стремится к квадратичному, причем, на графиках присутствует только одна ветвь. На всех графиках существует скопление при приближении к центру оси х. По данным графикам можно сделать вывод, что корреляция между максимальным током импульса отрицательной полярности и крутизной фронта импульса сильна. Найдем значение коэффициента корреляции при помощи функции «pearsonr» библиотеки scipy в программной среде Python.

По результатам вычисления коэффициент корреляции между  $I_{max}$  и  $a_{0.1}$  равен 0,748, между  $I_{max}$  и  $a_{0.3}$  равен 0,721, между  $I_{max}$  и  $a_{max}$  равен 0,794.

Боксплот максимального тока импульса положительной полярности

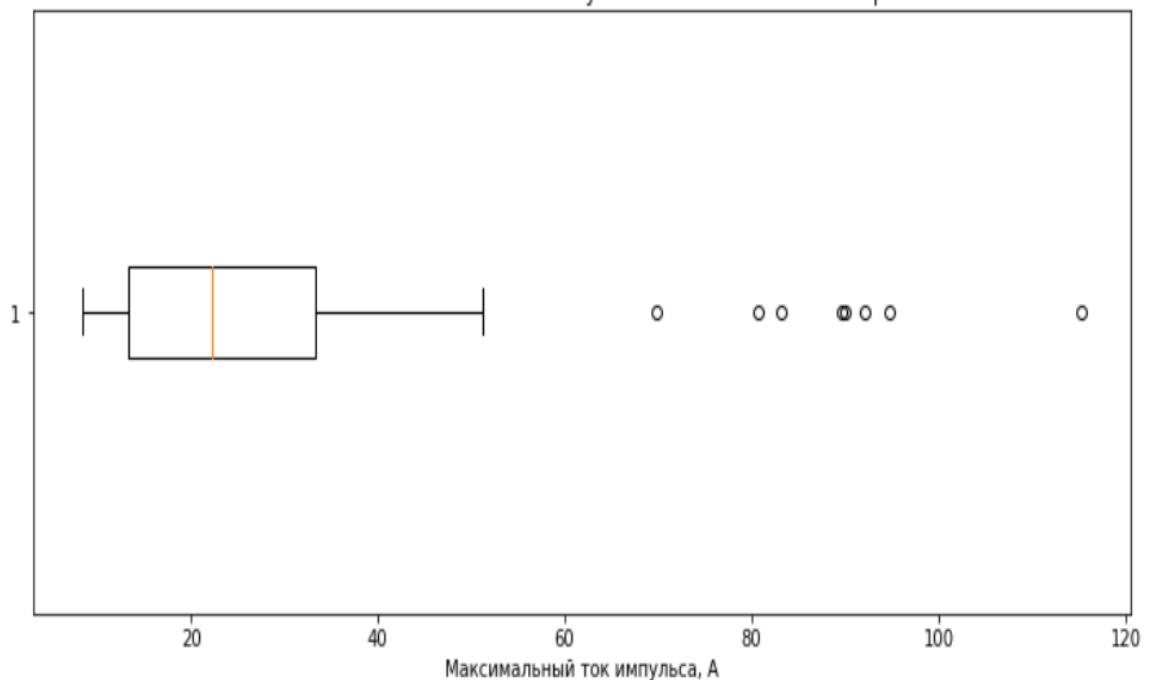


Рисунок 35 – Бокс плот максимального тока импульса положительной полярности.

Боксплот максимального тока импульса отрицательной полярности

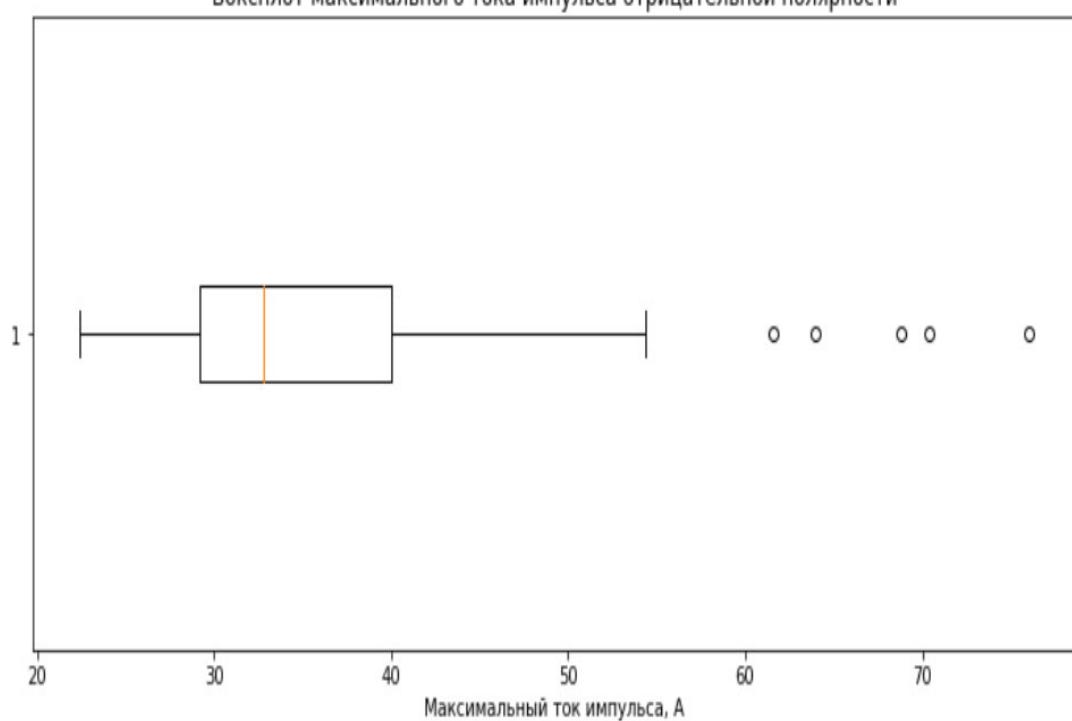


Рисунок 36 – Бокс плот максимального тока импульса отрицательной полярности.

Бокс-плот распределения максимального тока импульса положительной полярности показывает, что медианное значение тока сильно сдвинуто влево относительно центра оси x, имеется группа значений тока в интервале от 80 А до 100 А, остальные значения, превосходящие 0,75-ый quartиль распределены точечно.

Бокс-плот распределения максимального тока импульса отрицательной полярности показывает, что медианное значение тока также сдвинуто влево относительно центра оси x, однако менее выражено, чем при положительной полярности. Распределение значений тока при отрицательной полярности более нормально, чем при положительной и интервал между 0,25-ым и 0,75-ым quartilem более растянут. Значения тока, превосходящие 0,75-ый quartиль распределены точечно, не образуя выраженной группы.

Код программы представлен в приложении А.

### 3.5. Выводы по 3-ей главе

В результате была получена статистическая обработка экспериментальных данных. Были написаны программы, позволившие структурировать обработанные программой AnalyzeResults данные, построить сравнительные графики и графики распределения этих данных. Установлена корректность полученных для статистической обработки данных. Найдены основные статистические параметры данных импульсов тока, произведено их сравнение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был выполнен обзор литературы по механизмам зарядки частиц, способам и устройствам для создания заряженных аэрозольных образований. Самым распространенным способом зарядки является зарядка при помощи коронного разряда, а наиболее детально изученным устройством для образования заряженных аэрозолей – электрогазодинамические генераторы, использующие коронный разряд.

Изучен экспериментальный комплекс «Гроза», на базе которого проводились эксперименты и его характеристики. Проанализированы используемые в этом комплексе устройства для регистрации оптических и электрических характеристик разряда.

Была освоена программа AnalyzeResults, разработанная на кафедре ТЭВН в программной среде MatLab, позволяющая исследовать параметры тока разряда и обрабатывать зарегистрированные осцилограммы тока. При помощи нее было обработано 111 осцилограмм.

При помощи программной среды Python были написаны программы, позволяющие обрабатывать, анализировать и графически интерпретировать полученные данные осцилограмм.

По полученным результатам статистической обработки можно сделать вывод, что при отрицательной полярности заряженного облака при главной стадии разряда, в среднем, ток выше, чем при положительной и составляет порядка 35,12 А, при чем, ток при отрицательной полярности заряженного облака распределен более нормально и его медианное значение составляет 31,2 А. При положительной полярности среднее значение тока импульса равно 32,09 А, однако рассматривая полученное медианное значение, значение тока составляет 22,2 А, что на 30,8 % меньше относительно тока импульса при отрицательной полярности. Небольшая разница между средними значениями токов положительной и отрицательной полярности объясняется наличием

большого количества значений тока положительной полярности, превосходящих максимальный ток отрицательной полярности, равный 76 А. При этом, максимальный ток положительной полярности равен 115,2 А.

Длительность импульса тока положительного заряда по среднему значению равна 673,45 нс, а при отрицательной 609,49 нс. Однако, исходя из сравнительных гистограмм, такие значения обусловлены наличием небольшого количества продолжительных импульсов при положительной полярности. При положительной полярности максимальная длительность существенно больше, чем при отрицательной и составляет 1567,81 нс, когда максимальное значение длительности при отрицательном импульсе равно 842,5 нс. Длительности импульсов при положительной и отрицательной полярности распределены нормально.

Переносимый заряд при отрицательном токе импульса в среднем на 35,8 % больше, чем при положительной полярности, что объясняется большими медианными токами. Однако, максимальный переносимый заряд при положительной полярности больше и составляет 20203,2 нКл, а при отрицательной – 13086,4 нКл. Данное явление объясняется наличием при положительной полярности импульса токов, превосходящих максимальный ток при отрицательном импульсе.

Крутизна фронта импульса  $a_{max}$  при положительной полярности в среднем больше, чем при отрицательной в 1,989 раз, а отношение их максимальных значений равно 1,873. Средние значения крутизны фронта  $a_{0.1}$  примерно равны между собой и отличаются на 0,08 А/нс в сторону положительной полярности. Средние значения крутизны  $a_{0.3}$  больше при положительной полярности на 41,3 %, чем при отрицательной.

По сравнительным гистограммам и бокс плотам видно, что и переносимый заряд, и максимальный ток при отрицательной полярности разбросаны на меньшем интервале, в отличии от разрядов при положительно заряженном

облаке. Следовательно, эти параметры будет гораздо проще предсказать при отрицательном заряде.

По точечным гистограммам видно, что зависимость максимального тока от крутизны при отрицательной полярности стремится к квадратичной, тогда как при положительной полярности на графике корреляция отсутствует.

Из полученного анализа следует, что при отрицательной полярности искусственного заряженного аэрозоля максимальный ток в среднем выше, чем при положительной, он нарастает более плавно, чем ток при положительной полярности, исходя из соотношений крутизны фронта. Импульс длится в среднем меньше при отрицательной полярности, чем при положительной, однако в результате импульса переносится больший заряд при отрицательной полярности, чем при положительной.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. A new approach to estimate the annual number of global lightning fatalities / I.Cardoso, O. Pinto Jr., I. R. C. A. Pinto, R. Holle.
2. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учебник для вузов / И.М. Бортник и др.; под общ. ред. И.П. Верещагина. — М.: Издательский дом МЭИ, 2016.
3. Луканин, А. В. Инженерная экология: процессы и аппараты очистки газовоздушных выбросов: учеб. пособие / А.В. Луканин. — Москва: ИНФРА-М, 2019. — 523 с. — (Высшее образование: Бакалавриат).
4. Высоковольтные электротехнологии учебное пособие по курсу «Основы электротехнологии» Аношин О.А., Белогловский А.А., Верещагин И.П., Калинин А.В., Кривов С.А., Кужекин И.П., Орлов А.В., Панюшкин В.В., Соколова М.В., Темников А.Г. – М.: из-во МЭИ, 1999. – 204 с.
5. Темников А. Г., Орлов А.В., Болотов В.Н., Ткач Ю.В. Исследование характеристик искрового разряда между искусственным облаком заряженного водного аэрозоля и землей // ЖТФ, 2005, т.75, вып. 7, стр. 52-59.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

```
Ввод [134]: #Импортируем необходимые библиотеки.
import pandas as pd
import xml.etree.ElementTree as ET
import numpy as np

#Подготавливаем шаблон для съема.
path = 'C:\\\\Users\\\\kotko\\\\Desktop\\\\\\Oscillograms\\\\dpo7254\\\\_impulses\\\\oldstyle\\\\2017_04_28\\\\'
tree = ET.parse(f'{path}Test N 01 (Obt 0)\\\\results.xml')
root = tree.getroot()
cols = []
for i in range(0, 19):
    cols.append(root[6][7][i].tag)
df = pd.DataFrame(columns = cols, index = range(1,112))

#Считаем данные результатов эксперимента.
for i in range(1,112):
    values = []
    if len(str(i)) == 1:
        num = '0'+str(i)
    else:
        num = i
    tree = ET.parse(f'{path}Test N {num} (Obt 0)\\\\results.xml')
    root = tree.getroot()
    if len(root[6]) == 9:
        for j in range(0, 19):
            values.append(root[6][7][j].text)
    elif len(root[6]) == 18:
        if float(root[6][7][4].text) > float(root[6][8][4].text):
            for j in range(0, 19):
                values.append(root[6][7][j].text)
        else:
            for j in range(0, 19):
                values.append(root[6][8][j].text)
    else:
        array = np.array([float(root[6][7][4].text), float(root[6][8][4].text), float(root[6][9][4].text)])
        maximum = array.argmax() + 7
        for j in range(0, 19):
            values.append(root[6][maximum][j].text)
    for k, val in enumerate(values):
        df.iloc[i-1,k] = val

#Обрабатываем полученные данные .
df = df.drop(columns=[
    'Description', 'First_sign','index_start','index_stop','t_10','t_30','t_30max','t_90max'], axis=1)
df = df.astype(float)
df['T'] = df['t_stop'] - df['t_start']
df['deltaT'] = df['t_90end'] - df['t_90']
df['Imax'] = abs(df['Imax'])
df['Q'] = abs(df['Q'])
def f1(x):
    if x[0] > x[1]:
        return x[0]
    else:
        return x[1]

df = df.drop(columns=['t_90', 't_90end', 't_start', 't_stop'])

def f2(x):
    if x[1] - x[0] > 0:
        return 'Положительная'
    else:
        return 'Отрицательная'

df['Полярность'] = df.loc[:,['Aminus','Aplus']].apply(f2, axis = 1)

#Сохраним полученные данные в таблицу в формате xlsx.
df.to_excel('table1.xlsx', sheet_name='first')
```

Код программы для обработки экспериментальных данных и сохранения их в формате xlsx.

```
Ввод [118]: #Импортируем необходимые библиотеки
import matplotlib.pyplot as plt
#Построим гистограммы

cols = ['Imax', 'T']
xlabels = ['Максимальный ток импульса, А', 'Время импульса, нс']
titles = ['Гистограмма распределения тока, полярность +', 'Гистограмма распределения времени, полярность +']
polarity = ['Положительная', 'Отрицательная']
maxs = []
df_plot = df[df['Полярность'] == polarity[0]][cols]
maxs.append(df_plot[cols[0]].mean() * 10)
maxs.append(df_plot[cols[1]].mean() * 10)

figure, ax = plt.subplots(figsize=(12, 24), nrows = 4)
conuter = 0
for i in range(2):
    for j in range(2):
        df_plot = df[df['Полярность'] == polarity[i]][cols]
        ax[conuter].hist(df_plot[cols[j]], bins=15, range=(0, maxs[j]))
        ax[conuter].set_xlabel(xlabels[j])
        ax[conuter].set_ylabel('Количество значений')
        ax[conuter].set_title(titles[j] + polarity[i])
        conuter += 1
plt.show()
```

Код программы для проверки корректности экспериментальных данных.

```
Ввод [136]: df_pos = df[df['Полярность'] == 'Положительная']
(df_pos.describe()).to_excel('tablepos.xlsx')
df_neg = df[df['Полярность'] == 'Отрицательная']
(df_neg.describe()).to_excel('tableneg.xlsx')
```

Код программы для получения статистических параметров.

```

Ввод [5]: #импортируем необходимые библиотеки
import numpy as np
from scipy.stats.stats import pearsonr
#Строим гистограммы распределения максимальных токов.
fig, axes = plt.subplots(figsize=(12,128), nrows=11)

bins0 = np.linspace(0, df_pos['Aplus'].max(), 20)
axes[0].hist(df_pos['Aplus'], color='red', bins=bins0, alpha=0.4, label='Положительная полярность')
axes[0].hist(df_neg['Aminus'], color='blue', bins=bins0, alpha=0.4, label='Отрицательная полярность')
axes[0].set_xlabel('Максимальный ток импульса, A')
axes[0].set_ylabel('Количество значений')
axes[0].set_title('Сравнительная гистограмма распределения максимальных токов положительной и отрицательной полярности')
axes[0].legend()

#Строим гистограммы распределения длительности импульсов.
bins1 = np.linspace(0, df_pos['T'].max(), 20)
axes[1].hist(df_pos['T'], color='red', bins=bins1, alpha=0.4, label='Положительная полярность')
axes[1].hist(df_neg['T'], color='blue', bins=bins1, alpha=0.4, label='Отрицательная полярность')
axes[1].set_xlabel('Время импульса, нс')
axes[1].set_ylabel('Количество значений')
axes[1].set_title('Сравнительная гистограмма распределения длительности импульсов')
axes[1].legend()

#Строим гистограммы распределения длительности импульсов.
bins1 = np.linspace(0, df_pos['Q'].max(), 20)
axes[2].hist(df_pos['Q'], color='red', bins=bins1, alpha=0.4, label='Положительная полярность')
axes[2].hist(df_neg['Q'], color='blue', bins=bins1, alpha=0.4, label='Отрицательная полярность')
axes[2].set_xlabel('Переносимый заряд, нКл')
axes[2].set_ylabel('Количество значений')
axes[2].set_title('Сравнительная гистограмма распределения переносимого заряда')
axes[2].legend()

#Строим точечные диаграммы распределения максимальных токов относительно крутизны.
axes[3].scatter(x=df_pos['Aplus'], y=df_pos['a_10'], color='green', marker='*')
axes[3].set_xlabel('Максимальный ток импульса, A')
axes[3].set_ylabel('Крутизна тока импульса a_0,1, A/нс')
axes[3].set_title('Точечная диаграмма распределения максимального положительного тока относительно \
' крутизны a_0,1')

axes[4].scatter(x=df_pos['Aplus'], y=df_pos['a_30'], color='green', marker='*')
axes[4].set_xlabel('Максимальный ток импульса, A')
axes[4].set_ylabel('Крутизна тока импульса a_0,3, A/нс')
axes[4].set_title('Точечная диаграмма распределения максимального положительного тока относительно \
' крутизны a_0,3')

axes[5].scatter(x=df_neg['Aminus'], y=df_neg['a_10'], color='green', marker='*')
axes[5].set_xlabel('Максимальный ток импульса, A')
axes[5].set_ylabel('Крутизна тока импульса a_0,1, A/нс')
axes[5].set_title('Точечная диаграмма распределения максимального отрицательного тока относительно \
' крутизны a_0,1')

axes[6].scatter(x=df_neg['Aminus'], y=df_neg['a_30'], color='green', marker='*')
axes[6].set_xlabel('Максимальный ток импульса, A')
axes[6].set_ylabel('Крутизна тока импульса a_0,3, A/нс')
axes[6].set_title('Точечная диаграмма распределения максимального отрицательного тока относительно \
' крутизны a_0,3')

axes[7].scatter(x=df_pos['Aplus'], y=df_pos['a_max'], color='green', marker='*')
axes[7].set_xlabel('Максимальный ток импульса, A')
axes[7].set_ylabel('Максимальная крутизна тока импульса, A/нс')
axes[7].set_title('Точечная диаграмма распределения максимального положительного тока относительно \
' максимальной крутизны фронта')

axes[8].scatter(x=df_neg['Aminus'], y=df_neg['a_max'], color='green', marker='*')
axes[8].set_xlabel('Максимальный ток импульса, A')
axes[8].set_ylabel('Максимальная крутизна тока импульса, A/нс')
axes[8].set_title('Точечная диаграмма распределения максимального отрицательного тока относительно \
' максимальной крутизны фронта')

#Строим boxplots максимальных токов
axes[9].boxplot(df_pos['Aplus'], vert=False, manage_ticks=True)
axes[9].set_xlabel('Максимальный ток импульса, A')
axes[9].set_title('Боксплот максимального тока импульса положительной полярности')

axes[10].boxplot(df_neg['Aminus'], vert=False, manage_ticks=True)
axes[10].set_xlabel('Максимальный ток импульса, A')
axes[10].set_title('Боксплот максимального тока импульса отрицательной полярности')

print(pearsonr(df_neg['Aminus'], df_neg['a_10']))
print(pearsonr(df_neg['Aminus'], df_neg['a_30']))
print(pearsonr(df_neg['Aminus'], df_neg['a_max']))

```

Код программы для графической интерпретации данных.