### Оглавление

РЕФЕРАТ
Введение
Глава 1. ФИЗИКА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА 5
1.1. Свойства и особенности высокочастотного факельного разряда 5
Глава 2. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА, ГОРЯЩЕГО В ВОЗДУХЕ С ПЛАЗМОПОДАВЛЯЮЩИМИ ДОБАВКАМИ
2.1 Схема экспериментальной установки 12
2.2 Результаты измерений13
Глава 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЛНОВОГО ЧИСЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ, ПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙ ГОРЕНИЕ ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ С ПЛАЗМОПОДАВЛЯЮЩИМИ ДОБАВКАМИ
3.1. Методика измерений18
3.2. Результаты измерений 24
ВЫВОДЫ
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ
Приложение А
Приложение Б

#### РЕФЕРАТ

Выпуская квалификационная работа объемом 67 с., 19 рисунок, 18 таблиц, 50 источников, 2 приложения, 15 формул.

<u>Ключевые слова:</u> плазма, факельный разряд, волновое число, электромагнитная волна, плазмоподавляющие добавки.

Объектом исследования является высокочастотный факельный разряд.

<u>Цель работы:</u> Определение влияния плазмоподавляющих добавок на электродинамические характеристики факельного разряда, горящего в воздухе.

В процессе исследования проводились:

1. Измерение амплитуды и фазового сдвига радиальной компоненты электрического поля факельного разряда горящего в воздухе;

2. Определение коэффициента фазы и затухания электромагнитной волны поддерживающей горение высокочастотного факельного разряда в зависимости от концентрации плазмоподавляющих добавок;

3. Экономический расчет затрат на проведение выпускной квалификационной работы, составлен план-график работ;

4. Выводы по работе. Заключение.

В результате исследований

1. Проведены измерения осевого распределения напряжённости радиальной компоненты электрического поля высокочастотного факельного разряда горящего в смесях воздуха с углекислым газом и воздуха с парами воды;

2. Проведён расчёт волнового числа электромагнитной волны, поддерживающей горение высокочастотного факельного разряда;

 Проведено сопоставление результатов расчёта радиального распределения радиальной компоненты электрического поля с экспериментальными результатами.

<u>Область применения:</u> факельный разряд горящий в смеси воздуха с плазмоподавляющими добавками может быть использован в качестве генератора

плазмы при проведении различных плазмохимических процессов. В частности, высокочастотные плазменные установки на базе факельного разряда используются при сжигании нефтешламов, а также для утилизации отработанного ядерного топлива.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2007. Вычисления и построение графиков выполнялись с помощью математического пакета Matlab 6.0.

#### Введение

Высокочастотный факельный разряд в последнее время часто используется в качестве генератора плазмы при проведении различных плазмохимических процессов. В частности, высокочастотные плазменные установки на базе факельного разряда используются при сжигании нефтешламов, а также для утилизации отработанного ядерного топлива. Проведение вышеуказанных процессов происходит с образованием углекислого газа и паров воды. Пары воды имеют высокую теплоёмкость, что оказывает существенное влияние на процесс горения разряда. Также необходимо отметить электроотрицательные свойства молекулы воды, вследствие которых концентрация электронов разрядной плазмы существенно уменьшается. Изменение концентрации электронов разрядной плазмы в свою очередь оказывает влияние на процесс распространения электромагнитной волны, поддерживающей горение разряда. Наиболее важной величиной, характеризующий процесс распространения электромагнитной волны в плазме разряда является её волновое число. Действительная часть волнового числа представляет собой коэффициент затухания электромагнитной волны в плазме разряда, а мнимая коэффициент фазы, характеризующего замедление электромагнитной волны в плазме разряда. При добавлении плазмоподавляющих добавок происходит увеличение коэффициента затухания электромагнитной волны, и соответственно изменение плотности источников энерговыделения в плазме разряда. Аналогичное влияние на процесс горения разряда оказывает также и углекислый газ.

Данная выпускная квалификационная работа посвящена исследованию по определению зависимостей величины волнового числа электромагнитной волны, поддерживающей горение разряда, от концентрации паров воды и углекислого газа в разрядной камере факельного плазмотрона. Глава 1. ФИЗИКА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА

#### 1.1. Свойства и особенности высокочастотного факельного разряда

Высокочастотный факельный (одноэлектродный) разряд (ВЧФР) представляет собой плазменный шнур (рис.1.1.1.), горящий с поверхности электрода, к которому приложено ВЧ напряжение. ВЧФР может быть возбужден с поверхности не только проводника, но и диэлектрика.



Рис. 1.1.1 Высокочастотный факельный разряд

1 – приэлектродный слой; 2 – канал; 3 – диффузионная оболочка

ВЧФР был открыт Зилитинкевичем С.И. в 1928 году [9] при исследовании работы ВЧ генераторов. Заметим, что до 60-х годов проводились исследования одноэлектродных разрядов имеющих мощность не более 200 Вт.

Наиболее полные, на наш взгляд, исследования одноэлектродного разряда мощностью до 150-200 Вт, возбуждаемого синусоидальным ВЧ напряжением были проведены чешскими авторами [2, 8, 15-17].

При вышеуказанных величинах мощностей, вкладываемых в разряд авторы работ [2, 11] выделили три режима его горения, для каждого из которых существует свой механизм протекания физических процессов: высокочастотный коронный разряд; высокочастотный факельный разряд; высокочастотный дуговой разряд.

Высокочастотный коронный разряд представляет собой целый ряд искривленных плазменных каналов, выходящих из электрода в виде "короны",

либо имеет вид одного канал с размытой, диффузной структурой. Высокочастотная корона наблюдается [2] при частотах v<10 МГц, или в случае больших частот ВЧ-напряжения – при усиленном охлаждении плазмы разряда. Для высокочастотной короны характерна высокая степень неравновесности и соответственно существенное различие между температурой электронов [12]  $T_e$ = (6÷7) · 10<sup>3</sup> К и температурой тяжелых частиц T = (2÷3) · 10<sup>3</sup> К. Механизм горения высокочастотной короны объясняется на основе [13, 14] стриммерной теории.

Высокочастотный факельный разряд (рис. 1.1.1.) имеет три структурных [2] элемента: приэлектродный слой 1, канал 2 и диффузионную оболочку 3. Электропитание разряда осуществляется от ВЧ генератора. Горение ВЧФР наблюдается в широком частотном диапазоне, начиная с частоты v~6 МГц и выше. Механизм горения ВЧФР обусловлен [2] процессами термической ионизации.

Высокочастотная дуга представляет собой одноэлектродный разряд [10] при горении которого идет сильное испарение материала электрода. Вследствие этого при рассмотрении механизма горения высокочастотной дуги необходимо учитывать процессы на электроде, а также влияние присутствия газовой фазы материала электрода в плазме разряда. В случае охлаждения электрода высокочастотная дуга переходит в ВЧФР.

Вышеуказанные три типа одноэлектродного ВЧ разряда хорошо различаются лишь при малых мощностях высокочастотной энергии подводимой к разряду, так как в этом случае регулирование степени неравновесности плазмы разряда легко осуществить либо простым изменением подводимой к разряду мощности, либо охлаждением плазмы разряда газовым потоком.

При мощностях W>70Вт в случае охлаждаемого электрода можно наблюдать, как правило, только ВЧФР. Поэтому при работе с достаточно мощными разрядами, используемых в прикладных и исследовательских целях, возбуждаемых при частоте v>10МГц, одноэлектродный разряд можно отождествить с ВЧФР.

ВЧ факельный разряд с момента его открытия и до настоящего времени исследовался преимущественно в следующих направлениях:

1.исследование влияния различных факторов (формы, материала электрода, рода плазмообразующего газа, величины подводимой мощности) на свойства ВЧФР [2, 8, 10-12, 15-20];

2.исследование характеристик плазмы ВЧФР (температуры тяжелых частиц, температуры и концентрации электронов, степени неравновесности плазмы разряда) [7, 8, 10-12, 26-28];

3. теоретические и экспериментальные исследования вопросов тепломассопереноса в плазме ВЧФР [1, 6, 10-12, 26-28];

4. исследование амплитудно-модулированной плазмы ВЧФР [4, 34, 35];

5.изучение влияния внешних электрических полей на свойства и поведение ВЧФР [21-23, 31];

6.исследование вопроса согласования ВЧФР с ВЧ генератором [14, 41];

7.исследование электрических характеристик ВЧФР (напряжение горения, полный ток, емкость разряд-земля) [2, 27].

ВЧФР легко возбуждается в любой газовой среде (воздух, инертные газы, водород и т.д.) при давлениях  $10^1 \div 5 \cdot 10^5$  Па. Вид, форма, режимы горения ВЧФР освещены в работах [1, 2, 10, 11].

Из экспериментальных исследований следует, что структура ВЧФР и его размеры определяются свойствами плазмообразующего газа, характером и уровнем вводимой в разряд мощности. При давлениях более 3,3 ·10<sup>4</sup> Па свободный ВЧФР представляет собой плазменное образование с ярко выделенным тонким каналом и диффузионной оболочкой с радиусом в 3÷10 раз большем радиуса канала (рис. 1.1.1).

В таблице А.1 (Приложение А) и на рис. 1.1.2 и 1.1.3 представлены основные результаты экспериментальных исследований свойств и особенностей ВЧФР, горящего при атмосферном давлении.



разряда



Рис. 1.1.3. Зависимость длины канала ВЧФР от частоты

Достаточно много работ посвящено измерению температуры факельного разряда. В таблице А.1 приведены значения температуры канала ВЧФР. Как видно из таблицы А.1 газовая температура ВЧФР в значительной степени зависит от рода плазмообразующего газа и частоты питающего разряд электромагнитного поля. Газовая температура зависит также [11,18] от мощности, вкладываемой в разряд и от ВЧ частоты (рис.1.1.4 и рис. 1.1.5).



Рис. 1.1.4. Зависимость температуры в канале ВЧФР температуры ВЧФР от мощности W [36, 37]



Рис. 1.1.5. Зависимость температуры в канале ВЧФР от частоты поля v [5, 29]

В свою очередь, исследования по пространственному распределению температур (рис. 1.1.6, 1.1.7) указывают на существенное падение температур в радиальном направлении и на относительно слабое падение осевой температуры  $(dT/dr \ge dT/dz)$ . Заметим, что температура ВЧФР в молекулярных газах составляет (3÷5)·10<sup>3</sup> К. Это различие связано с большей эффективностью передачи

энергий от электронов к тяжелым частицам в молекулярных газах по сравнению с атомарными. В случае даже незначительных добавок молекулярного газа [15, 17] температура ВЧФР горящего в атомарном газе значительно повышается. В работе [36] измерялась также температура диффузионной оболочки ВЧФР. Для ВЧФР горящего в атмосферном воздухе температура диффузионной оболочки составляет 2200-2500 К.

Сравнение результатов измерений газовой температуры с температурой электронов показывает, что при частоте поля в десятки мегагерц различие между ними порядка ( $T_e/T = 1,5-2,5$ ). Однако, в случае, когда частота запитывающего разряд поля лежит в СВЧ диапазоне разница между электронной температурой и газовой становится более существенной ( $T_e/T = 5-25$ ). В работе [37] также показано, что распределение электронов по скоростям в канале ВЧФР имеет вид, отличающийся от максвелловского. Таким образом, мы можем сделать вывод о существенной неравновесности плазмы ВЧФР.



Рис. 1.1.6. Радиальное распределение ВЧФР температуры [30, 34]



Рис. 1.1.7. Распределение температуры вдоль оси свободного ВЧФР [34]

Характеристики разрядной плазмы ВЧФР в сильной степени зависят от частоты электромагнитного поля, мощности подводимой к разряду и величины расхода плазмообразующего газа. В работе [11] показано, что с уменьшением частоты (при заданной мощности) увеличивается длина канала разряда и уменьшается температура плазмы. Изменение длины канала разряда в зависимости от частоты электромагнитного поля приведены на рис. 1.1.3.

По данным работы [11] вышеуказанная зависимость имеет логарифмический характер. Авторы работы [3] в свою очередь предлагают использовать зависимость вида L ~  $\omega^{1/2}$ ,

где L - длина канала разряда,  $\omega$  - частоты электромагнитного поля.

Представляет собой интерес также процесс передачи энергии от электромагнитного поля к плазме ВЧФР. Так, авторы работы [8] высказывают предположение о влиянии на механизм передачи электромагнитной энергии процессов диссоциативной рекомбинации. В ВЧФР горящем в воздухе или азоте при атмосферном давлении вблизи электрода присутствуют ионы  $N_2^+$ , имеющие потенциал возбуждения 18 эВ. Данные молекулярные ионы диффундируют от электрода в разрядную плазму, где посредством столкновений с электронами они диссоциативно рекомбинируют в атомы азота. Так как энергия диссоциации молекулярного азота составляет 9,7 эВ, образующиеся атомы получают кинетическую энергию 8,3 эВ, которая вследствие столкновений быстро диссоциирует преимущественно в виде хаотического теплового движения частиц плазмы. Данный механизм передачи электромагнитной энергии подтверждается измерениями температуры разряда [38], горящего в молекулярных газах с различными энергиями диссоциации.

ВЧФР является сильным атомизатором. В работах [8, 39] показано, что атомизация в плазме ВЧФР составляет от 15% до 25%.

При описании ВЧФР большое значение имеет определение таких величин как емкостное сопротивление, адмитанс, активное сопротивление плазмоида ВЧФР. В работе [27] показано, что теоретический расчет вышеуказанных величин, основывающийся лишь на геометрических характеристиках плазмоида разряда без учета происходящих в нем физических процессов приводит к серьезным ошибкам. Вследствие этого большинство работ по определению электрических параметров разряда носит экспериментальный характер.



Рис. 1.1.8.Зависимость емкостного сопротивления ωС, проводимости G, адмитанса Y и тока I от мощности W разряда; 1 - воздух; 2 – аргон.

На рис.1.1.8 приведены зависимости, полученные авторами работ [32, 33] для емкостного сопротивления, проводимости и адмитанса плазмоида ВЧФР, горящего при атмосферном давлении в воздухе и аргоне в зависимости от величины высокочастотной мощности, подводимой к разряду. Как видно на рис. 1.1.8 электрические характеристики плазмоида ВЧФР сильно зависят от рода плазмообразующего газа и геометрических размеров разряда, которые в свою очередь зависят от величины высокочастотной мощности.

Учет процессов, происходящих в плазме ВЧФР и их влияние на результаты расчетов электрических параметров плазмоида разряда, рассмотрены в работах [27, 42]. Из результатов работ [43, 44] также следует, что вольтамперная характеристика ВЧФР ( рис. 1.1.8, таблица А (Приложение А)) имеет возрастающий характер.

# Глава 2. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА, ГОРЯЩЕГО В ВОЗДУХЕ С ПЛАЗМОПОДАВЛЯЮЩИМИ ДОБАВКАМИ.

#### 2.1 Схема экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Факельный разряд возбуждался в воздухе. Частота электромагнитного поля составляла 37 МГц. В качестве разрядной камеры использовалась кварцевая труба диаметром 28 мм. Длина канала разряда в зависимости от концентрации паров воды варьировалась от 5 см до 27 см. Водяной пар подавался в разряд соосно плазмообразующему газу. Влажность воздуха контролировалась гигрометром РСЕ – 310. Температура воздуха при этом составляла 30°С. Отдельно проводились измерения характеристик факельного разряда, горящего в смеси воздуха и углекислого газа. Содержание углекислого газа в плазмообразующей смеси газов составляло 0...30 %.



Рис. 2.1.1. Схема экспериментальной установки. 1 – ВЧ факельный разряд; 2 – емкостные и индуктивные зонды; 3 – измерительный прибор; 4 – генератор «опорного» сигнала.

Измерения электродинамических характеристик факельного разряда проводились емкостными зондами, перемещаемыми относительно плазмоида разряда (Рис. 2.1.2). Емкостной зонд представлял собой медный штырь длиной 3...5 мм. Сигнал от емкостного зонда по линии с двойной экранировкой подавался на вход измерительного прибора.



Рис 2.1.2. Емкостной зонд.

В зависимости от вида измеряемой величины в качестве измерительного прибора использовался либо осциллограф, либо фазометр. При измерении фазового сдвига для увеличения точности измерений использовался также генератор «опорного» сигнала.

#### 2.2 Результаты измерений

Волновое число электромагнитной волны определялось на основе анализа экспериментальных измерений радиального распределения радиальной компоненты электрического поля. Измерения проводились для двух случаев: факельного разряда горящего в смеси воздуха с углекислым газом и смеси воздуха с парами воды.

Радиальное распределение определялось в случае изменения радиальной координаты в диапазоне от 20 до 110 мм от оси разряда. Нижняя граница измерения составляла 20 мм и определялась возможностью пробоя разряда на емкостной зонд, а так же диаметром разрядной трубки. Верхняя граница размещалась там, где была установлена обойма для емкостного зонда.

Результаты измерений амплитуды и фазового сдвига радиальной компоненты электрического поля факельного разряда горящего в смеси воздуха с углекислым газом представлены на рисунках:



Рис 2.2.1. Радиальное распределение амплитуды напряженности радиальной компоненты электрического поля факельного разряда горящего в смеси воздуха с углекислым газом; 1 – концентрация CO<sub>2</sub> 5 %, 2 – концентрация CO<sub>2</sub> 15 %, 3 – концентрация CO<sub>2</sub> 25 %.

Таблица 2.2.1. Результаты измерений амплитуды напряженности радиальной компоненты электрического поля факельного разряда горящего в смеси воздуха с углекислым газом

	<b>R</b> , м	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11
F	[CO <sub>2</sub> ] = 5 %	293	191	139	108	87	71	60	51	44	38
Е <sub>г,</sub> В/м	[CO <sub>2</sub> ] = 15 %	215	138	99	75	59	47	39	32	27	22
	[CO <sub>2</sub> ] = 25 %	178	112	79	59	46	36	29	24	19	16



Рис 2.2.2. Радиальное распределение фазового сдвига радиальной компоненты электрического поля факельного разряда горящего в смеси воздуха с углекислым газом; 1 – концентрация CO<sub>2</sub> 5 %, 2 – концентрация CO<sub>2</sub> 15 %, 3 – концентрация CO<sub>2</sub> 25 %.

Таблица 2.2.2. Результаты измерений фазового сдвига радиальной компоненты электрического поля факельного разряда горящего в смеси воздуха с углекислым газом

	R, м	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11
	[CO <sub>2</sub> ] = 5 %	2,38	2,33	2,29	2,24	2,18	2,12	2,07	2,01	1,95	1,88
Ψ <sub>Er,</sub> рад	[CO <sub>2</sub> ] = 15 %	2,38	2,32	2,26	2,19	2,11	2,03	1,95	1,87	1,79	1,71
	[CO <sub>2</sub> ] = 25 %	2,34	2,27	2,18	2,09	1,99	1,90	1,80	1,69	1,59	1,49

Результаты измерений амплитуды и фазового сдвига радиальной компоненты электрического поля факельного разряда горящего в смеси воздуха с парами воды представлены на рисунках:



Рис 2.2.3. Радиальное распределение амплитуды напряженности радиальной компоненты электрического поля факельного разряда горящего в смеси воздуха с парами воды; 1 – концентрация паров воды 20 %, 2 – концентрация паров воды 60 %, 3 – концентрация паров воды 100 %.

Таблица 2.2.3. Результаты измерений амплитуды напряженности радиальной компоненты электрического поля факельного разряда горящего в смеси воздуха с парами воды

	R, м	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11
Е <sub>г,</sub> В/м	[пары воды] = 20 %	332	217	159	124	100	83	70	60	52	45
	[пары воды] = 60 %	150	94	65	48	37	28	22	18	14	12

[пары воды] =	109	64	42	29	21	15	11	8	6	5
100 %	107	04	72	2)	<i>2</i> 1	15	11	0	U	5



Рис 2.2.4. Радиальное распределение фазового сдвига радиальной компоненты электрического поля факельного разряда горящего в смеси воздуха с парами воды; 1 – концентрация паров воды 20 %, 2 – концентрация паров воды 60 %, 3 – концентрация паров воды 100 %.

Таблица 2.2.4. Результаты измерений фазового сдвига радиальной компоненты электрического поля факельного разряда горящего в смеси воздуха с парами воды

	R, м	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11
Ψ <sub>Er,</sub> рал	[пары воды] = 20 %	2,38	2,35	2,31	2,27	2,22	2,17	2,12	2,07	2,02	1,96
I - C	[пары воды] = 60 %	2,31	2,21	2,10	1,99	1,88	1,76	1,64	1,52	1,39	1,27

[пар	ы воды]	2 15	2 35	2 23	2 12	1 00	1 87	1 75	1.62	1 /0	1 36
= 10	00 %	2,43	2,33	2,23	2,12	1,99	1,07	1,75	1,02	1,49	1,30

Из рисунков видно, что амплитуда радиальной компоненты электрического поля меняется с изменением радиальной координаты, примерно как функция 1/г, а фазовый сдвиг – как линейная функция.

С повышением концентрации углекислого газа и паров воды, уменьшается амплитуда и фазовый сдвиг радиальной компоненты электрического поля. Так же видно, что при увеличении радиальной координаты, амплитуда и фазовый сдвиг радиальной компоненты электрического поля уменьшается.

# Глава З. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЛНОВОГО ЧИСЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ, ПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙ ГОРЕНИЕ ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ С ПЛАЗМОПОДАВЛЯЮЩИМИ ДОБАВКАМИ

#### 3.1. Методика измерений

Измерение волнового числа электромагнитной волны проводилось на основе измерений радиального распределения амплитуды и фазового сдвига радиальной компоненты электрического поля. Заметим, что для цилиндрических структур в непроводящей зоне распределение радиальной компоненты электрического поля приведено в [45] функцией Ханкеля 1-го рода 1-го порядка:

$$E_r = AH_1^{(1)} \left( r\sqrt{k^2 - h^2} \right)$$
(3.1.1)

Здесь А – константа; H<sub>1</sub><sup>(1)</sup> –функция Ханкеля 1-го рода 1-го порядка; k – постоянная распространения электромагнитной волны в воздухе; h – волновое число электромагнитной волны; r – радиальная координата.

Таким образом, сопоставляя результаты расчётов величины E<sub>r</sub>, проведённых по формуле (3.1.1) с результатами экспериментальных измерений, можно получить информацию о волновом числе и соответственно определить

величины коэффициентов фазы и затухания электромагнитной волны, распространяющейся в разряде.

Так как волновое число, фигурирующее в выражении (3.1.1) является комплексной величиной и определяется двумя параметрами  $\alpha$  и  $\beta$ , то и для его однозначного нахождения требуется проводить сопоставление расчётных и экспериментальных результатов по двум параметрам. В нашем случае этими параметрами являлись отношение амплитуд  $E_r|_{r=30}/E_r|_{r=90}$  и разность фаз  $\Psi_{Er}|_{r=30}-\Psi_{Er}|_{r=90}$  радиальной компоненты электрического поля на расстоянии 30 мм и 90 мм от оси разряда.

Результаты расчётов величин отношения амплитуд  $E_r|_{r=30}/E_r|_{r=90}$  и разности фаз  $\Psi_{Er}|_{r=30}-\Psi_{Er}|_{r=90}$  радиальной компоненты электрического поля с использованием формулы (3.1.1) при различных значениях  $\alpha$  и  $\beta$  представлены на рисунках 3.1.1, 3.1.2.



Рис.3.1.1. Зависимость отношения амплитуд напряжённости электрического поля от коэффициентов фазы и затухания электромагнитной волны.



Рис. 3.1.2. Зависимость фазового сдвига напряжённости электрического поля от коэффициентов фазы и затухания электромагнитной волны.

Как видно из этих рисунков отношение амплитуд зависит преимущественно от величины коэффициента фазы, в то время как коэффициент затухания определяется в основном разностью фаз.

Таким образом, сопоставляя результаты расчётов величины  $E_r$ , проведённых по формуле (3.1.1), с результатами экспериментальных измерений можно получить информацию о волновом числе и соответственно определить коэффициентов величины фазы затухания электромагнитной И волны, распространяющейся в разряде.

В качестве примера рассмотрим исходную матрицу значений волнового числа следующего вида:

1.0000 + 1.0000i 2.0000 + 1.0000i 3.0000 + 1.0000i 4.0000 + 1.0000i 5.0000 + 1.0000i 6.0000 + 1.0000i 7.0000 + 1.0000i 8.0000 + 1.0000i 9.0000 + 1.0000i 10.0000 + 1.0000i

1.0000 + 2.0000i 2.0000 + 2.0000i 3.0000 + 2.0000i 4.0000 + 2.0000i 5.0000 + 2.0000i 6.0000 + 2.0000i 7.0000 + 2.0000i 8.0000 + 2.0000i 9.0000 + 2.0000i 10.0000 + 2.0000i

1.0000 + 3.0000i 2.0000 + 3.0000i 3.0000 + 3.0000i 4.0000 + 3.0000i 5.0000 + 3.0000i 6.0000 + 3.0000i 7.0000 + 3.0000i 8.0000 + 3.0000i 9.0000 + 3.0000i 10.0000 + 3.0000i

1.0000 + 4.0000i 2.0000 + 4.0000i 3.0000 + 4.0000i 4.0000i 4.0000i 5.0000 + 4.0000i4.0000i 6.0000 + 4.0000i 7.0000 + 4.0000i 8.0000 + 4.0000i 9.0000 + 4.0000i10.0000 + 4.0000i

1.0000 + 5.0000i 2.0000 + 5.0000i 3.0000 + 5.0000i 4.0000 + 5.0000i 5.0000 + 5.0000i5.0000i 6.0000 + 5.0000i 7.0000 + 5.0000i 8.0000 + 5.0000i 9.0000 + 5.0000i10.0000 + 5.0000i

1.0000 + 6.0000i 2.0000 + 6.0000i 3.0000 + 6.0000i 4.0000 + 6.0000i 5.0000 + 6.0000i6.0000i 6.0000 + 6.0000i 7.0000 + 6.0000i 8.0000 + 6.0000i 9.0000 + 6.0000i10.0000 + 6.0000i

1.0000 + 7.0000i 2.0000 + 7.0000i 3.0000 + 7.0000i 4.0000 + 7.0000i 5.0000 + 7.0000i 6.0000 + 7.0000i 7.0000 + 7.0000i 8.0000 + 7.0000i 9.0000 + 7.0000i10.0000 + 7.0000i

1.0000 + 8.0000i 2.0000 + 8.0000i 3.0000 + 8.0000i 4.0000 + 8.0000i 5.0000 + 8.0000i 6.0000 + 8.0000i 7.0000 + 8.0000i 8.0000i 8.0000i 9.0000 + 8.0000i 10.0000 + 8.0000i

1.0000 + 9.0000i 2.0000 + 9.0000i 3.0000 + 9.0000i 4.0000 + 9.0000i 5.0000 + 9.0000i9.0000i 6.0000 + 9.0000i 7.0000 + 9.0000i 8.0000 + 9.0000i 9.0000 + 9.0000i10.0000 + 9.0000i

1.0000 +10.0000i 2.0000 +10.0000i 3.0000 +10.0000i 4.0000 +10.0000i 5.0000 +10.0000i 6.0000 +10.0000i 7.0000 +10.0000i 8.0000 +10.0000i 9.0000 +10.0000i 10.0000 +10.0000i На основе этой матрицы проведём расчёт величины отношения амплитуд  $E_r|_{r=30}/E_r|_{r=90}$  и разности фаз  $\Psi_{Er}|_{r=30}-\Psi_{Er}|_{r=90}$  радиальной компоненты электрического поля.

Функция для величины отношения амплитуд  $E_r|_{r=30}/E_r|_{r=90}$  будет иметь вид:

[A,B] = meshgrid(1:10,1:10); H = A + j\*B; Y = besselh(1,H\*0.03); Z = besselh(1,H\*0.09); K = abs(Y)./abs(Z)

Получим матрицу значений отношения амплитуд  $E_r|_{r=30}/E_r|_{r=90}$ : 3.0162 2.9765 2.8002 2.7387 2.6796 2.9229 2.8625 2.6239 2.5719 2.5237 3.0890 3.0609 3.0200 2.9714 2.9188 2.8650 2.8120 2.7607 2.7119 2.6659 3.1825 3.1612 3.1290 3.0891 3.0445 2.9975 2.9499 2.9029 2.8573 2.8137 3.2933 3.2765 3.2503 3.2170 3.1787 3.0947 3.0517 3.1375 3.0093 2.9680 3.4197 3.4059 3.3841 3.3557 3.3225 3.2860 3.2475 3.2081 3.1686 3.1297 3.5606 3.5489 3.5303 3.5058 3.4766 3.4440 3.4092 3.3730 3.3363 3.2996 3.6417 3.7154 3.7053 3.6891 3.6676 3.6124 3.5807 3.5473 3.5131 3.4785 3.8839 3.8750 3.8608 3.8417 3.8184 3.7919 3.7628 3.7320 3.7000 3.6674 4.0583 4.0074 4.0662 4.0456 4.0284 3.9832 3.9564 3.9277 3.8977 3.8668 4.2626 4.2555 4.2440 4.2284 4.2092 4.1869 4.1621 4.1353 4.1071 4.0778

Аналогичным образом для разности фаз  $\Psi_{\rm Er}|_{\rm r=30} - \Psi_{\rm Er}|_{\rm r=90}$  радиальной компоненты электрического поля.

[A,B]=meshgrid(1:10,1:10);H=A+j\*B;Y=besselh(1,H\*0.03);Z=besselh(1,H\*0.09);K=angle(Y)-angle(Z)

-0.0184 -0.0412 -0.0697 -0.1038 -0.1428 -0.1861 -0.2331 -0.2830 -0.3354 -0.3898

-0.0263 -0.0549 -0.0870 -0.1231 -0.1630 -0.2065 -0.2531 -0.3023 -0.3539 -0.4073

-0.0318 -0.0649 -0.1003 -0.1386 -0.1797 -0.2238 -0.2704 -0.3194 -0.3704 -0.4232

-0.0358 -0.0725 -0.1107 -0.1510 -0.1936 -0.2384 -0.2854 -0.3344 -0.3852 -0.4376

-0.0389 -0.0784 -0.1191 -0.1612 -0.2051 -0.2508 -0.2983 -0.3475 -0.3983 -0.4506

-0.0414 -0.0832 -0.1259 -0.1697 -0.2148 -0.2615 -0.3095 -0.3591 -0.4100 -0.4622

-0.0434 -0.0871 -0.1315 -0.1768 -0.2231 -0.2706 -0.3193 -0.3693 -0.4204 -0.4727

-0.0451 -0.0904 -0.1362 -0.1828 -0.2302 -0.2785 -0.3279 -0.3783 -0.4297 -0.4821

-0.0465 -0.0932 -0.1403 -0.1879 -0.2363 -0.2854 -0.3354 -0.3862 -0.4380 -0.4906

-0.0477 -0.0955 -0.1437 -0.1924 -0.2416 -0.2914 -0.3420 -0.3933 -0.4454 -0.4982

Результаты измерений радиального распределения радиальной компоненты электрического поля для случая факельного разряда, горящего в воздухе с парами воды, и имеющего мощность 1 кВт представлены на рис. 3.1.3. На этом же рисунке пунктиром приведены расчётные данные, выполненные в соответствии с формулой (3.1.1). Как видно из приведённых данных, расчётные и экспериментальные данные практически совпадают, что в

 $\Psi_{Er,}$ 

 $E_r$ ,

свою очередь говорит о корректности определения величины волнового числа путём использования формулы (3.1.1).



Рис. 3.1.3. Радиальное распределение амплитуды – (1) и фазового сдвига – (2) радиальной компоненты электрического поля факельного разряда; – – эксперимент, – – расчёт.

#### 3.2. Результаты измерений

Путём сопоставления расчётных и экспериментальных данных были получены значения величин коэффициентов фазы и затухания электромагнитной волны, поддерживающей горение факельного разряда. Вышеуказанные величины определялись в зависимости от величины концентрации паров воды и углекислого газа в плазмообразующем газе.



Рис. 3.2.1. Зависимость коэффициента затухания α и коэффициента фазы β электромагнитной волны от концентрации CO<sub>2</sub> в плазмообразующем газе.

Результаты представлены на рис. 3.2.1 для факельного разряда мощностью 1 кВт, горящего в смеси воздуха с углекислым газом. Из рисунка видно, что при увеличении концентрации углекислого газа в воздухе происходит увеличение коэффициента затухания и коэффициента фазы электромагнитной волны. Полученные зависимости имеют монотонный характер. При этом величина коэффициента затухания электромагнитной волны незначительно отличается от величины коэффициента фазы.

Результаты измерения волнового числа электромагнитной волны, распространяющейся в воздушной плазме факельного разряда с парами воды, приведены на рис. 3.2.2.



Рис. 3.2.2. Зависимость коэффициента затухания α и коэффициента фазы β электромагнитной волны от влажности плазмообразующего газа

Из этого рисунка следует, что и в этом случае с увеличением концентрации плазмоподавляющей добавки происходит увеличение коэффициента затухания и коэффициента фазы электромагнитной волны. Однако при этом зависимость изменения коэффициента фазы имеет немонотонный характер. При увеличении относительной влажности воздуха более 90% наблюдается незначительное уменьшение коэффициента фазы.

Подобное аномальное поведение электродинамических характеристик факельного разряда в этом диапазоне изменения влажности воздуха может быть

обусловлено изменением характера взаимодействия между молекулами воды. Заметим, что изменение удельной электропроводности плазмы разряда, обусловленное увеличением концентрации отрицательных ионов кислорода, может также сопровождаться изменением величины её диэлектрической проницаемости. Известно, что величина волнового числа электромагнитной волны, распространяющейся вдоль канала факельного разряда описывается [46] следующим выражением:

$$h = j\sqrt{\frac{2}{5}} \frac{1}{a} \left(\varepsilon_0 + j\frac{\sigma}{\omega}\right)^{-1/2}$$
(3.2.1)

Здесь j – мнимая единица; a – радиус канала разряда; ε<sub>0</sub> – диэлектрическая проницаемость плазмы разряда; σ – удельная электропроводность плазмы разряда; ω – частота электромагнитного поля.

Таким образом, согласно выражению (3.2.1) волновое число, а соответственно и коэффициенты фазы и затухания электромагнитной волны будут зависеть как от величины удельной электропроводности плазмы разряда, так и от величины её диэлектрической проницаемости.

Из рис. 3.2.2 также следует, что при увеличении влажности воздуха уменьшение коэффициента фазы электромагнитной волны менее выражено, чем соответствующее изменение её коэффициента затухания.

Сопоставление результатов представленных на рисунках 3.2.1 и 3.2.2 позволяет сделать вывод о более выраженном влиянии паров воды на процесс затухания электромагнитного поля в плазме разряда по сравнению с углекислым газом. Заметим, что влагосодержание воздуха в десятки раз меньше величины его относительной влажности. Так при температуре 30° С при 30% влажности влагосодержание воздуха составляет 0,01 кг водяного пара на кг сухого воздуха. Следовательно, одно и тоже затухание электромагнитного поля в плазме разряда наблюдается при добавлении в плазмообразующий газ количества водяных паров в несколько раз меньшего по массе чем соответствующего количества углекислого газа.

### выводы

Исследованы физические свойства высокочастотного факельного разряда. По результатам проведённых исследований установлен рост коэффициента фазы и коэффициента затухания электромагнитной волны, поддерживающей горение разряда с увеличением концентрации плазмоподавляющих добавок в газе.

Проведено исследование влияния плазмоподавляющих добавок на электродинамические характеристики факельного разряда, горящего в воздухе. По результатам проведённых исследований, показано, что плазмоподавляющие добавки в виде паров воды по сравнению с аналогичными добавками в виде углекислого газа оказывают большее влияние на процесс распространения электромагнитной волны в плазме разряда.

Установлено, что при относительной влажности воздуха более 90% наблюдается аномальное уменьшение коэффициента затухания электромагнитной волны.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке плазмохимических технологий, основанных на использовании факельного разряда, горящего в смеси воздуха с углекислым газом и парами воды.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Тихомиров И.А. Высокочастотные факельные плазмотроны и их практическое применение // Известия СО АН СССР, Серия техн. наук, 1980, -№8, вып.2, - с. 3-13
- Trunecek V. Unipolar high frequency discharge// Folia Fac. Sci. Nat. University. 1971, - V. 12, -pp.3-13
- Качанов А.В., Трехов Е.С., Фетисов Е.П. Электродинамическое описание высокочастотного факельного разряда//Физика газоразрядной плазмы. – М., 1968. – Вып.1. – с. 39-47
- Тихомиров И.А. Квеско С.Б. Плазма амплитудно-модулированного высокочастотного факельного разряда и перспективы ее использования//Физика и химия обработки материалов, 1984. - №6. – с. 35-37
- Тихомиров И.А., Луценко Ю.Ю., Емельянов В.Н. Высокочастотный плазмотрон с электропитанием разряда гибридной электромагнитной волной//Труды XI Всесоюзн. конф. по генераторам н/т плазмы. – Новосибирск, 1989, - с.99-100
- Тихомиров И.А., Луценко Ю.Ю. Электродинамическая модель высокочастотного факельного разряда с учетом отражения электромагнитной волны в канале разряда//Тез. докл. V Всесоюзн. конф. по физике газового разряда, Омск, 1990. – с.81
- Ткаченко А.Г., Корючкин А.В., Луценко Ю.Ю., Гамзинов С.В. Теплоэлектрофизические параметры секционированного высокочастотного факельного плазмотрона//Плазменная техника, технология, Казань, 1988. – с.4
- Trunecek V. Unipolar and electrodeless capacitively coupled high-frequency dischanges excited at atmospheric pressure and their applications//Acta physica slovaca, 1979. – Bd 29. – p.180-183
- Зилитинкевич С.И. Электрическое факельное истечение//Телеграфия и телефония без проводов, 1928, № 9. – с.652

- Trunecek V.Fackelentladung und Fackelboden//Beitrage aus der Plasmaphysic. – 1962, Vol. 1, № 2. – s.116-121
- 11. Григорович Р., Кристеску Д. К теории высокочастотного факельного разряда//Оптика и спектроскопия, 1959, № 6, Вып. 2. с.129-136
- El Gamal M.//Contr. Pap. of 8 Int. Conf. jn Ijniz. Gases, Vienna. 1967. p.237
- Кузовников А.А., Канцов Н.А. Исследование высокочастотного разряда в диапазоне от 1,5 до 15 МГц // Изв. Вузов. Физика, 1960, № 6. – с.64-70
- 14. Кузовников А.А., Цянь-Гао-Юнь. Исследование высокочастотного разряда в диапазоне от 1,5 до 15 МГц//Изв. Вузов. Физика, 1960, № 5. – с.55-59
- 15. Farchy V., Janca J. Energishe Verholtnisse in Plasma empoligar // Beitr.Plasmaphysik. – Bd.9.- 1968. – s.129-142
- 16. Каріска V. Измерение концентрации заряженных частиц в факельном разряде//Ceskosl. casor.fus. 1967. А17. №1. s.5-9
- 17. Janca J Transmission and energe excharge in unipolar h. f. discharges//Folia prirodovedecke fac. U.J.E.P. Brno. 1968. Bd.9. № 10. p.21-40
- Тихомиров И.А. и др. Исследование пространственного распределения параметров ВЧ факельного разряда. І. Газовая температура//Деп. в ВИНИТИ. - 1973. - № 7606-73. – с.1-3
- 19. Тихомиров И. А., и др. Свойства и особенности ВЧ разрядов и их практическое применение//В сб. "Аппаратура и методы исследований плазмы ВЧ разрядов", Томск, Изд. ТГУ, 1976, с.4-16
- 20. Тихомиров И.А. и др. Гидродинамика и теплофизика плазменных потоков высокочастотного факельного разряда// В сб. "Аппаратура и методы исследований плазмы ВЧ разрядов", Томск, Изд. ТГУ, 1976, с.17-22
- Прокофьев А.М. Влияние постороннего постоянного электрического поля на факельное истечение // ЖЭТФ. = 1937. - №8. – с.987-989

- 22. Trunecek V. Effects of superimposed d.c.field on temperatute of torch dischange// 9th Internat. Conf. Phenomena Ioniz.Gases. 1969. Budapesht. –p.354
- Trunecek V., Talsky A. Effects of superimposed d.c.field on h.f.unipolar discharges//9th Internat. Conf. Phenomena Ioniz.Gases. 1969. Budapesht. –p.355
- 24. Джамакумеев Р., Девятов А.М. Температуры высокочастотного факельного разряда в их переходной области//Оптика и спектроскопия. –т.13. – Вып.1. –с.20-24
- 25. S. Lonz., W. Lochte-Holtgrewen., G.Traving. Spectroscopische Untersuchungeiner in Helium-gas bei Atmospharendruck brennerded Fackelladung//Z.Phus. – 1965. – 197. - №1. s.1-15
- 26. U.Jecht, W. Kessler O механизме возбуждения факельного разряда на частоте 2400 МГц// Z.Phys. 1964. 178. №2. с.133-145
- 27. Farsky, J.Janca. Mutual relation among macro and microparameters in unipolar h.f.discharges//Scripta.Fac.Sci.U.J.E.P –1972. Bd.2 p.119-127
- 28. Нейман М.С. О факельном разряде//Известия электропромышленности слабого тока. 1935. №7. с.7-9
- 29. Nalsky A. Определение комплексного сопротивления высокочастотного факельного разряда. Czech. J. Phys. 1964. Bd.14. s.594-598
- 30. Тихомиров И.А., Тихомиров В.В., Левашов В.С. Факельный разряд, как линия с распределенными параметрами // Изв. ТПИ. – 1976. – т.276. – с.12-15
- Захаров В.К. Исследование влияния внешних электрических полей на высокочастотный факельный разряд // ТВТ. – 1972. – 10. - №3. – с.291-498
- 32. Mollwo L. Electronentemperatur und Electronenraushen in der hochfreguenten Fackelentladung // Ann. der Phys. 1958. №2. s.97-129
- 33. Зоммерфельд А. Электродинамика. М.:ИЛ, 1958. 410с.

32

- 34. Марусин В.В., Тихомиров И.А. Получение амплитудномодулированной плазмы // Генераторы низкотемпературной плазмы. М.:
  - 1969. – с.110-115
- 35. Марусин В.В., Тихомиров И.А., Юрьев Ю.Г. Влияние амплитудной модуляции на свойства ВЧФ разряда // Генераторы низкотемпературной плазмы. М.: 1969. с.116-118
- 36. Голованивский К.С., Кузовников А.А. Исследование характеристик высокочастотного разряда // ЖТФ. – 1961. – т.3. – с.890-892
- 37. Тихомиров И.А., Марусин В.В. К распределению электронов по энергиям в ВЧ факельном разряде // ЖТФ. 1967. т.38. №1. с.34-35
- 38. Trunecek V. Temperature and prosesses of dissociation in unipolar discharge//VIII Semin. on Plasma Research. CSAV. 1975. p.28
- Cobine J.D., Wilbur D.A. Atomization in torch discharges // J.Appl. Phys. 1951. – v.22. – p.835
- 40. Ткаченко А.Г. Исследование теплофизических и газодинамических характеристик плазменной струи высокочастотного факельного разряда // Неравновесные процессы в разряженных средах. Новосибирск. 1983. с.28-31
- 41. Качанов А.В. и др. Некоторые вопросы согласования высокочастотных генераторов с нагрузкой в виде факельного разряда//Физика газоразрядной плазмы. М., 1968. – Вып.1. – с.68-74
- 42. Zidkova O. Diploma prace. University Brno. 1971
- 43. Тихомиров И.А. и др. Некоторые электрофизические характеристики высокочастотного факельного разряда // Известия ТПИ. 1976. с.60-65
- 44. Тихомиров И.А. и др. Оценка работы высокочастотных факельных плазмотронов//в кн.: Материалы к VII Всесоюзн. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. Алма-Ата. 1977. с.148-151
- 45. Vlasov V. A., Tikhomirov I. A., Lutsenko Y. Y. (2006). Determination of the wave number of an electromagnetic wave propagating in high-frequency torch discharge plasma. *Thermophysics and Aeromechanics*, 13(1), 131-134.

- 46. Stratton J. A. *Electromagnetic theory* (1941) New York: McGraw-Hill
- 47. И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Криницына; Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие //. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
- 48. Федеральный закон от 24.07.2009 №212-ФЗ «О страховых взносах в Пенсионный фонд Российской Федерации, Фонд социального страхования Российской Федерации, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования»
- 49. Федеральный закон «Трудовой кодекс РФ» от 21.12.2001 г.
- 50. ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.

## Приложение А

Таблица А.1 – Основные результаты исследований свойств и особенностей ВЧФР, горящего при атмосферном давлении.

Мощн ость, Р <sub>0</sub> , Вт	Плазмо образу ющий газ	Част ота, v·10 <sup>-</sup> <sup>6</sup> , Гц	Радиу с канал а ВЧФР , а ·10 <sup>2</sup> , м	Длина разряда , L ·10 <sup>2</sup> , м	Пров одим ость, о, см/м	Газова я темпер атура, T <sub>г</sub> ·10 <sup>-3</sup> , К (в канале)	Темпера тура электро нов (канала) T <sub>e</sub> ·10 <sup>-3</sup> , К	Ток в разряде , I, А	Напряже ние разряда U ·10 <sup>-3</sup> , В	Напряже ннсоть электрич еского поля, $E \cdot 10^{-2}$ , B/M	Концентр ация электрон ов, n <sub>e</sub> ·10 <sup>-6</sup> , м <sup>-</sup>	Лите рату ра
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
16000	воздух	0,75	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	[42]
150- 1000	воздух	-	0,06- 0,18	3,1-2,8	-	-	-	-	-	-	-	[41]
-	воздух	40	-	5,22	-	-	-	0,8-1,6	-	-	-	[41]
200- 800	воздух	40	-	-	-	3,5-3,9	-	-	-	-	-	[40]
750	<b>O</b> <sub>2</sub>	37	0,15	-	0,82	-	-	-	-	-	$1,3 \Box 10^{12}$	[11]
670	СО	37	0,1	-	-	-	-	-	-	-	$1,5 \Box 10^{12}$	[11]
800	$CO_2$	37	0,14	-	-	-	-	-	-	-	$3\Box10^{11}$	[11]
1020	воздух	37	0,25	-	-	4,2	-	-	-	400	$6 \Box 10^{12}$	[11]
920	воздух	37	1,17	-	-	3,8	-	-	-	500	$7 \Box 10^{11}$	[11]
-	аргон	-	-	-	-	1,4-2,0	6,0-7,0	-	-	дек.13	-	[39]
-	воздух	-	-	-	-	3,0-5,0	6,5	-	-	300-500	-	[46]
-	аргон	-	-	-	-	1,4	-	-	-	-	-	[48]

-	азот	_	-	-	-	4	-	-	-	-	-	[48]
-	воздух	-	-	-	I	3,8-4,2	-	-	-	-	-	[48]

Продолжение таблицы А.1

-	a301	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	[40]
-	воздух	-	-	-	-	3,8-4,2	-	-	-	-	-	[48]
_	_ `.			-								

100	гелий	26	-	-	-	0,9	25	-	-	-	$1,2 \square 10^{13}$ - $3,0 \square 10^{15}$	[47]
500- 600		34	-	-	-	-	7,8	-	-	-	$\begin{array}{c} 0,7 \square 10^{14} - \\ 1,9 \square 10^{14} \end{array}$	[38]
500- 600		34	-	-	-	0,9	7,4	-	-	-	$3,2\Box 10^{13}$ - $1,5\Box 10^{14}$	[38]
-	воздух	40	-	-	-	3,5	7	1,24	-	-	-	[38]
15- 308	воздух	8,7	-	-	-	-	-	$4 \Box 10^{-3}$ - $3 \Box 10^{-2}$	3,6-4,4	-	-	[39]
30	азот	30	-	-	-	3,8	-	-	-	_	$10^{11} - 10^{12}$	[37]
-	воздух	30	-	-	-	3,8-4,2	-	-	-	300-500	$5 \square 10^{10} - 10^{11}$	[46]
20- 200	воздух	12- 100	0,24- 0,34	0,3- 36,6	-	3,3-4,3	-	0,01- 0,14	-	-	-	[43]
500- 600	воздух	июн. 20	-	15-20	-	-	-	-	-	-	-	[31]

# Приложение Б

Таблица Б.1 – SWOT–анализ

	Сильные стороны	Слабые стороны
	научно-	научно-
	исследовательского	исследовательского
	проекта:	проекта:
	С1. Низкая	Сл1.Неизученность
	себестоимость	метода и сложности в
	плазмоподавляющих	его развитии
	добавок.	Сл2. Низкая
	С2. Экономичное	актуальность
	использование	исследований
	электроэнергии.	
	СЗ.Компактность	
	установки	
	С4. Простота монтажа	
	установки и	
	эксплуатация.	
Возможности:	Результаты анализа	Результаты анализа
В1. Проведение	интерактивной матрицы	интерактивной матрицы
дальнейших	проекта полей	проекта полей «Слабые
исследований и	«Сильные стороны и	стороны и
открытие новых	возможности»:	возможности»: В свою
перспектив	Проведению	очередь неизученность
В2.Усовершенствование	дальнейших	метода, а также низкая
установки	исследованию и	актуальность может
В3. Сотрудничество с	открытию новых	внести много
научными	перспектив,	трудностей при работе с
исследовательскими	усовершенствованию	установкой и разработке
центрами	установки и	новых проектов.
	сотрудничеству с	
	научными	
	исследовательскими	
	центрами могут	
	поспособствовать выше	
	перечисленные сильные	
	стороны НИП, такие как	
	дешевизна, простота и	
	компактность.	

Угрозы:	Результаты анализа	Результаты анализа
У1. Появление более	интерактивной матрицы	интерактивной матрицы
актуальных методик	проекта полей	проекта полей «Слабые
У2. Малый спрос на	«Сильные стороны и	стороны и угрозы»:
установку.	угрозы»	могут отрицательно
	Угрозы слабо влияют	сказаться на реализации
	на сильные стороны	данной установки в
	проекта, так как	научно-
	присутствует	исследовательской
	возможность ее	деятельности, так как
	усовершенствования и	малый спрос и
	проведения новых	появление более
	опытов.	актуальных методик
		могут сыграть свою
		роль.

Категория	Этап	Солержание работ	Должность		
Категория	Jian	Содержание работ	исполнителя		
Разработка ТЗ на	1	Составление и утверждение	руководител		
ВКР	1	технического задания	Ь		
Выбор	2	Изучение поставленных задач	дипломник		
направления	3	Подбор и изучение научно-	дипломник		
исследования	4	Календарное планирование работ по теме	дипломник		
		Проведение теоретических расчетов	руководител		
	5	и обоснований	ь,		
			дипломник		
		Построение макетов (моделей) и			
Теоретические и	6	проведение экспериментов	дипломник		
экспериментальны е исследования		Компьютерное моделирование	руководител		
	7	изучаемого процесса	ь,		
			дипломник		
	8	Сопоставление результатов			
		экспериментов с теоретическими	дипломник		
		исследованиями			
	9	Анализ и обработка полученных	дипломник		
Обобщение и		пезупьтатов Обсуждение результатов и их оценка	рукоролител		
оценка	10	обсуждение результатов и их оценка	руководител		
результатов	10		липпомник		
		Оформление пояснительной записки			
	11	и графических работ	дипломник		
Оформление	10	Полготовка к защите темы			
отчета ВКР	12		дипломник		
	13	Репетиция защиты	дипломник		

## Таблица Б.2 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

№ работ	Вид работ	Исполнители	Тк, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ						
				Май						
				2	3 - 4	5 - 10	11	12 - 14	15 - 17	18 - 20
	Составление и									
1	утверждение	руководитель	1							
	технического задания			11 V						
2	Изучение	липпомник	2							
	поставленных задач	Динию	2							
	Подбор и изучение	дипломник	6							
3	научно-технической									
	литературы									
	Календарное	дипломник	1							
4	планирование работ по									
	теме									
	Проведение	руководитель, дипломник	2					88888		
5	теоретических							*****		
5	расчетов и обосно-									
	ваний									
6	Построение макетов	руководитель, дипломник	2							
	(моделей) и									
	проведение									
	экспериментов									
	Pinientob									

Таблица Б.3 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

	Компьютерное				
7	моделирование изучаемого процесса	руководитель, дипломник	2		

## Продолжение таблицы Б.3

No			Тк,	Γ	Іродол	іжительно	сть выпс	ыполнения работ		
napot	Вид работ	Исполнители	кал.	Май	ĺ	Май	Май	Июнь	Июнь	
paoor			дн.	21	22	23 - 29	30 - 31	1 - 8	9 - 14	
	Сопоставление		1							
	результатов									
8	экспериментов с	дипломник			]					
	теоретическими									
	исследованиями									
9	Анализ и обработка	дипломник	2			•				
10	Обсужление результатов	руководитель, дипломник	7				1			
	и их оценка						4			
11	Оформление	дипломник	2							
	пояснительной записки и									
	графических работ									
12	Подготовка к защите	дипломник	8							
	темы		0						]	
13	Репетиция защиты	дипломник	6							











