

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Жермоленко Егор Олегович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение электрического поля плазменного стримера при
взаимодействии с поверхностью воды**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18306

Научный руководитель:

П. П. Гугин

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 2019 г.

Преподаватель практикума:

В. Б. Рева

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 2019 г.

Куратор практикума:

к.т.н. В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 2019 г.

*Рекомендуется к публикации в сборнике избранных курсовых работ
Научный руководитель
Преподаватель практикума
Куратор практикума*

Измерение электрического поля плазменного стримера при взаимодействии с поверхностью воды

Жермоленко Егор Олегович

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа № 18306, 3 семестр, 2019 год.

Научный руководитель:

Гугин Павел Павлович

Аннотация

В работе было произведено измерение распределения электрического поля, создаваемого плазменным стримером атмосферного давления при различных конфигурациях электродов, в том числе при взаимодействии плазменной струи с поверхностью воды. Было определено, что напряженность поля увеличивается с появлением в системе дополнительного заземлённого электрода, а также открытой воды, предположительно, ввиду её проводимости и повышенной концентрации водяных паров над её поверхностью, которые могут вступать во взаимодействие с плазмой.

Ключевые слова: плазменный стример, распределение поля, плавающий потенциал.

Оглавление

1. Введение.....	4
2. Теоретическая часть	5
3. Экспериментальная установка.....	12
4. Результаты.....	14
5. Выводы	19
6. Список литературы	19

1. Введение

В настоящее время генераторы низкотемпературной плазмы применяются во многих отраслях промышленности, например, в сельском хозяйстве или в инженерии для обработки материалов [1]. Одной из характерных черт холодной плазмы атмосферного давления является то, что при взаимодействии, например, с кожей человека не происходит ожога или удара током, поэтому её можно применять к разным биологическим объектам. Особое применение благодаря этому свойству плазма нашла в медицине [1]. Существует предположение, что холодная плазма атмосферного давления будет крайне эффективна в борьбе с различными видами онкологии ввиду особенностей строения раковых клеток [1], которые позволяют им пропускать внутрь себя вещества, образующиеся в плазме, которые будут уничтожать раковые клетки, не нанося вреда здоровым [2]. В настоящее время исследуется взаимодействие электрического поля, создаваемого стримером, с биораствором в рамках большого исследовательского проекта по терапии отдельных форм рака [1]. Одним из этапов этого проекта являются эксперименты с использованием специально подготовленных мышей. Ряд особенностей этого эксперимента требует создания условий минимального воздействия электрических полей на организм мыши. На мышах будут испытывать терапевтические свойства струи. На данный момент необходимо исследовать общее распределение электрического поля, наводящегося в области плазменного стримера, радиус действия и величину, а также какое изменение в распределении и величине поля появится при внесении в систему различных дополнительных условий, в частности заземлённых и расположенных под плавающим потенциалом проводящих и диэлектрических мишеней, а также водной поверхности, которая моделирует поверхности живого организма. Наличие водяных паров над поверхностью воды более высокой концентрации, чем в окружающем воздухе, может оказывать влияние как на распространение плазменной струи и распределение её поля, так и на её химический состав. Таким образом, целью

работы является исследование распределения импульсного электрического поля, создаваемого головкой стримера и переносимой им плазмой в струе благородного газа в воздухе атмосферного давления при различном составе мишеней на пути распространения стримера.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Изучить принцип работы генератора плазменной струи в воздухе атмосферного давления.
2. Ознакомиться со способами измерения распределения импульсных электрических полей в системе электродов с заданным распределением потенциалов.
3. Зарегистрировать электрическое поле в области плазменного стримера.
4. Используя экспериментально полученные данные, построить модель распределения поля, генерируемого распространяющимся стримером при наличии мишени различного типа, в том числе водной поверхности.

2. Теоретическая часть

В данной работе используется стримерный тип разряда. Стримеры – узкие светящиеся каналы ионизированного газа, возникающие в предпробойной стадии коронного или искрового разряда при больших давлениях и межэлектродных расстояниях [3]. Разветвленные светящиеся каналы стримера удлиняются и замыкают собой промежуток между катодом и анодом, образуя непрерывные проводящие нити и искровые каналы. Образование искрового канала сопровождается увеличением тока в нем, резким повышением давления, возникновением ударной волны на границе канала. Передняя, ярко светящаяся часть нитевидного канала называется головкой стримера. В зависимости от направления движения головки стримера различают катодный и анодный стримеры. Стримерная стадия пробоя газа занимает промежуточное положение

между лавинной и искровой. При малых значениях давления и расстояния между электродами может сразу перейти в искровую, минуя стадию стримера [4]. Характерным отличием стримера от электронной лавины является высокая скорость распространения его головки к катоду или аноду, значительно превосходящая дрейфовую скорость электрона во внешнем электрическом поле [4].

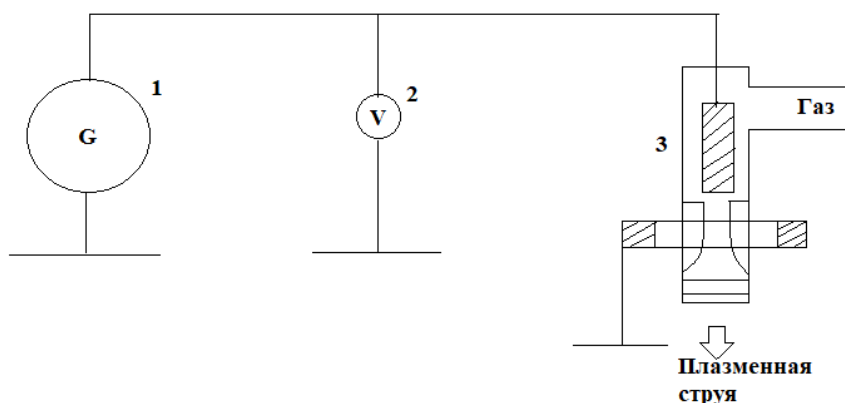


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – генератор напряжения; 2 – вольтметр; 3 – разрядная структура.

На рис. 1 изображена схема экспериментальной установки. Она состоит из генератора высоковольтного синусоидального напряжения, вольтметра и разрядной структуры, показанной на рис.2., которая включает в себя потенциальный электрод 1, заземленный кольцевой электрод 2 и стеклянную трубку 3 с капилляром 4 на конце, через которую прокачивается рабочий газ гелий или аргон, смешивающийся с воздухом.

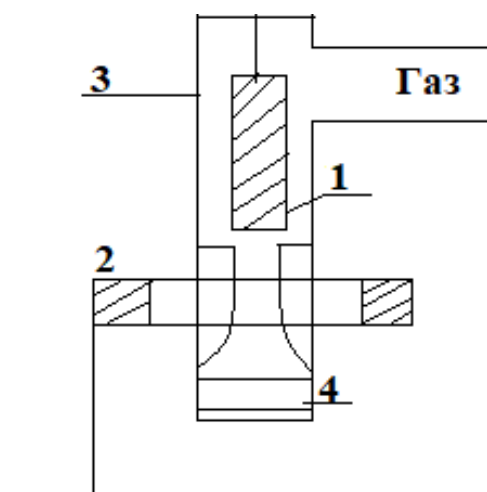


Рис. 2. Разрядная структура: 1 – потенциальный электрод; 2 – заземлённый кольцевой электрод; 3 – диэлектрическая трубка; 4 – капилляр.

Скорость прокачки контролируется расходомером, установленным на редуктор баллона с газом. Зажигание разряда происходит при достижении напряжения зажигания, которое зависит как от скорости потока газа, так и от его сорта. Из-за высокого сопротивления генератора напряжения и низкой емкости разрядной структуры отсутствуют условия для поддержания самостоятельного разряда, вследствие чего формируются небольшие сгустки плазмы, которые ускоряются разностью потенциалов электродов и выносятся через капилляр в атмосферу. За этим сгустком тянется плазменный «хвост», поэтому внешне разряд выглядит, как непрерывная струя плазмы, вытекающая из капилляра на расстояние 1 – 6 см. Поток газа также обеспечивает вынос оставшейся плазмы из полости трубки 3 за время меньше периода колебания питающего напряжения ($f = 33$ кГц).

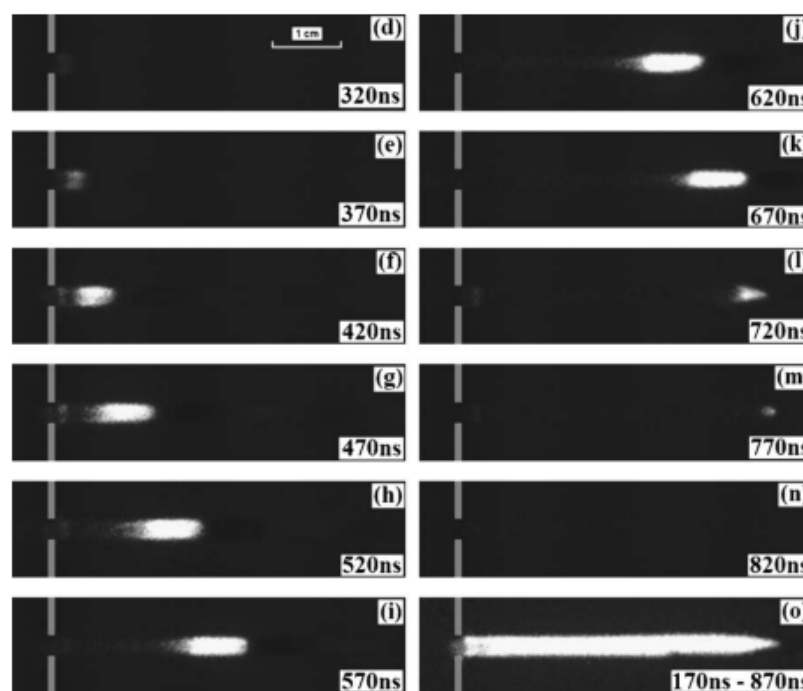


Рис. 3. Фотографии сгустка плазмы, сделанные высокоскоростной камерой [5].

На рис. 3 изображено движение сгустка плазмы. В работе [5] приводятся фотографии распространения головки стримера в близких условиях. Снимки производились каждые 50 наносекунд. На фотографии в правом нижнем углу представлен участок движения, пройденный за 600 наносекунд; явно различим плазменный «хвост», о котором упоминалось выше [5].

Для демонстрации движения плазменного сгустка и лучшего понимания

распределения плазмы можно привести результаты следующего эксперимента. Вдоль движения струи на расстоянии 1 см друг от друга были установлены датчики в форме кольца, вырезанные из фольгированного текстолита, через отверстия в которых пролетал сгусток плазмы (рис.4).

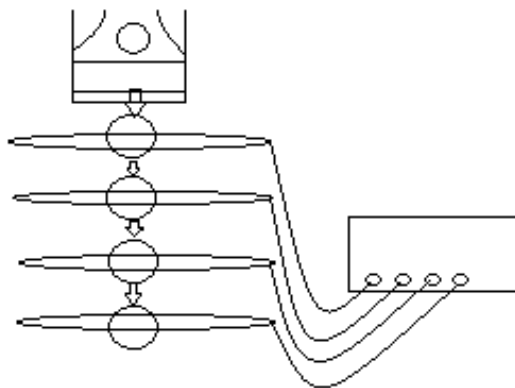


Рис.4. Регистрация сгустка плазмы при помощи датчиков кольцевой формы

Характерная осциллограмма приведена на рис. 5. Из нее видно, что скорость пролета составляет 4000 м/с и постепенно замедляется. При этом за сгустком тянется след плазмы.

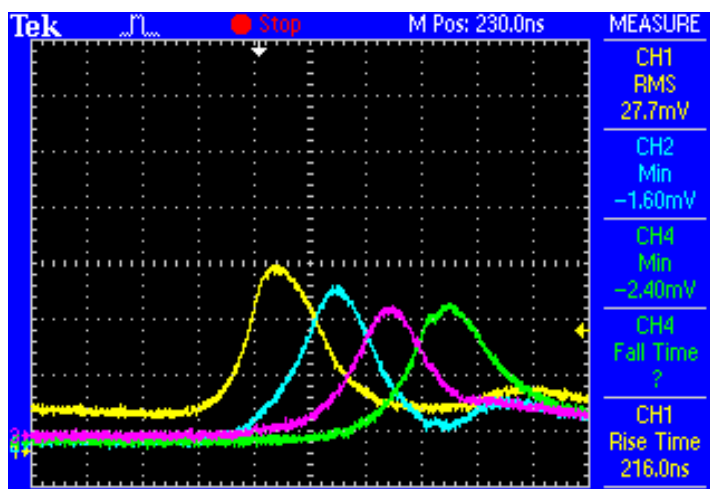


Рис. 5. Осциллограмма движения сгустка плазмы внутри генератора плазмы

Для того, чтобы разобраться в распределении электрических потенциалов, рассмотрим, для начала, квазистационарный случай. Изначально в системе плазменного генератора отсутствовала плазма и силовые линии электрического поля, обозначенные на рис. 6 сплошными стрелками, были направлены от потенциального электрода к заземлённому кольцу. С увеличением напряжения на генераторе возрастает напряженность поля. При достижении предельного значения напряженности возникает разряд. Газ, находящийся в

диэлектрической трубке, ионизируется, образуется плазма, сгустки вылетают из генератора. Вследствие проводимости плазмы, которая ведёт себя как продолжение потенциального электрода до головки стримера, распределение поля изменяется, как показано на рис. 5. точечными и прерывистыми стрелками.

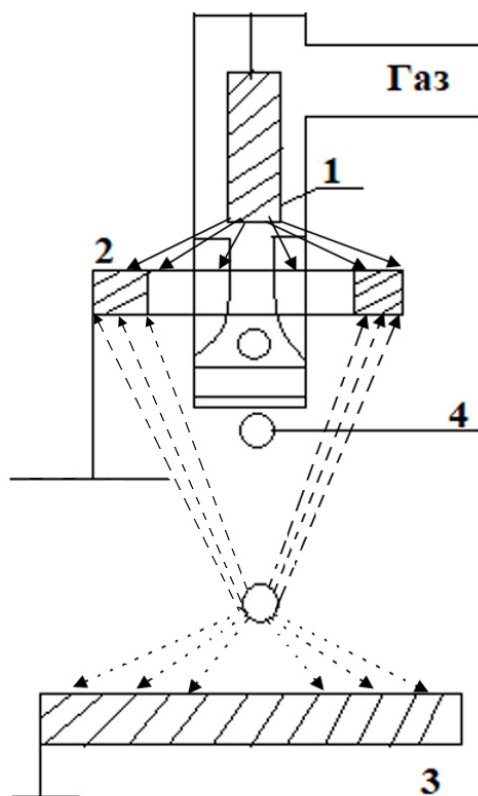


Рис. 6. Распределение электрического поля при наличии плазмы в системе с дополнительным земляным электродом: 1 – потенциальный электрод; 2,3 – заземлённые электроды; 4 – сгустки плазмы

Напряженность поля определяется уравнением Пуассона:

$$\operatorname{div} \nabla \varphi = 4\pi(n_e - n_i), E = -\nabla \varphi, \quad (1)$$

где n_e, n_i – электронная и ионная плотность соответственно, e – элементарный заряд, E – напряженность поля, φ – электрический потенциал.

Согласно теоретическим расчётам, проведённых для аргона при напряжении 4,9 кВ [1], наличие дополнительного заземлённого электрода существенно увеличивает электронную плотность, а также нормальную составляющую напряженности поля. Напряженность поля у поверхности воды уменьшается. Максимальная величина напряженности нормальной компоненты

электрического поля – 56 кВ/см.

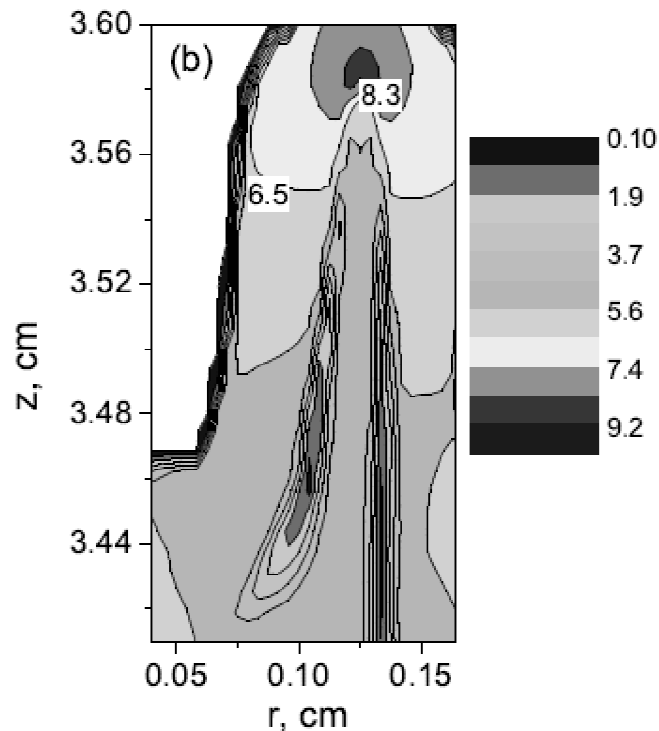


Рис. 7. Распределение электрического поля в пространстве с использованием заземлённого электрода [1].

В работе электрическое поле измерялось при помощи датчика напряженности, роль которого выполнял плоский квадратный конденсатор [7].

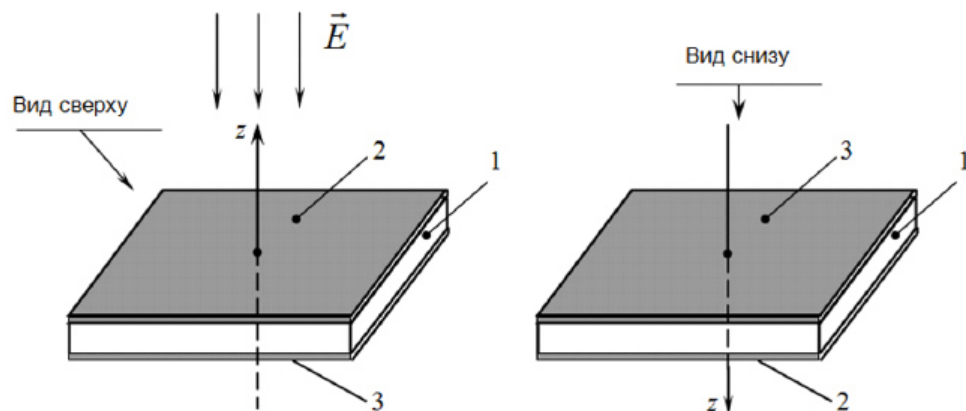


Рис. 8. Датчик напряженности электрического поля с подложкой в форме квадратной пластины: 1 – полиамидная плёнка; 2,3 – обкладки конденсатора.

Помещая датчик напряженности перпендикулярно силовым линиям электрического поля, образовавшегося в области распространения плазменной струи, на его обкладках произойдёт разделение электрических зарядов: положительные переместятся по направлению поля, отрицательные – против

этого направления. В результате, на верхней обкладке конденсатора индуцируются отрицательные, а на нижней – положительные заряды, разграниченные плоскостью электрической и геометрической нейтрали (рис. 9б). Электрические заряды, индуцированные на пластинах внешним полем, создадут собственное поле, которое будет направлено против внешнего. В результате, внутри датчика результирующее поле будет равно нулю [6].

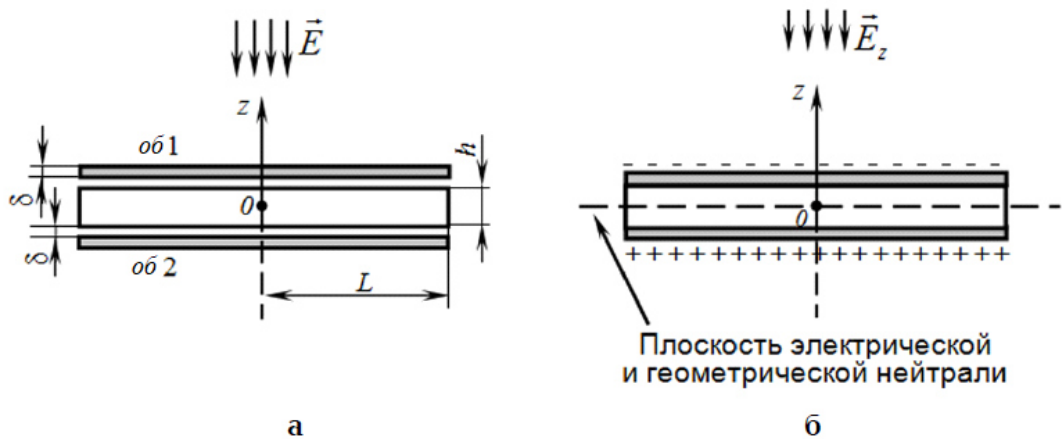


Рис. 9. Конструктивные параметры датчика и его взаимодействие с электрическим полем

Так как обкладки проводящие, то возможно определить величины зарядов из взаимодействия обкладок с внешним полем. На поверхности пластины конденсатора существует только нормальная составляющая E_n напряженности поля; она равна напряжённости E_0 внешнего поля [7]. По теореме Гаусса электрическое поле E_n создаёт поверхностную плотность зарядов [8],

$$\sigma = -2\varepsilon\varepsilon_0 E_n = -2\varepsilon\varepsilon_0 E_0, \quad (2)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость среды. Из выражения (2) видно, что поверхностная плотность зарядов постоянна; заряды распределяются равномерно по поверхности обкладок [6].

Определить полный заряд, индуцирующийся на обкладках, можно из следующего выражения:

$$Q = \oint \sigma dS. \quad (3)$$

Определим величину зарядов, индуцированных на обкладках, по формуле ниже:

$$Q_0 = \pm \int_{-L_y}^{+L_y} \int_{-L_x}^{+L_x} 2\varepsilon\varepsilon_0 E_0 dx dy = \pm 2\varepsilon\varepsilon_0 E_0 \int_{-L_y}^{+L_y} \int_{-L_x}^{+L_x} dx dy = \pm 8\varepsilon\varepsilon_0 E_0 L_x L_y,$$

где Q_0 – заряд, индуцируемый внешним полем; знак «-» относится к верхней обкладке; знак «+» - относится к нижней обкладке. Так как конденсатор имеет квадратную форму, то $L_x = L_y = L$. Общий заряд будет равен:

$$Q_0 = \pm 8\varepsilon\varepsilon_0 E_0 L^2. \quad (4)$$

Согласно выражению (4), заряды на обкладках пропорциональны напряженности внешнего поля. Соответственно, они могут использоваться в качестве меры напряженности [6].

3. Экспериментальная установка

На рис. 10 представлена схема датчика электрического поля. Датчик представляет собой плоский конденсатор прямоугольной формы. Внутри датчика полиамидная плёнка с $\varepsilon = 3$ и толщиной 40 микрон.

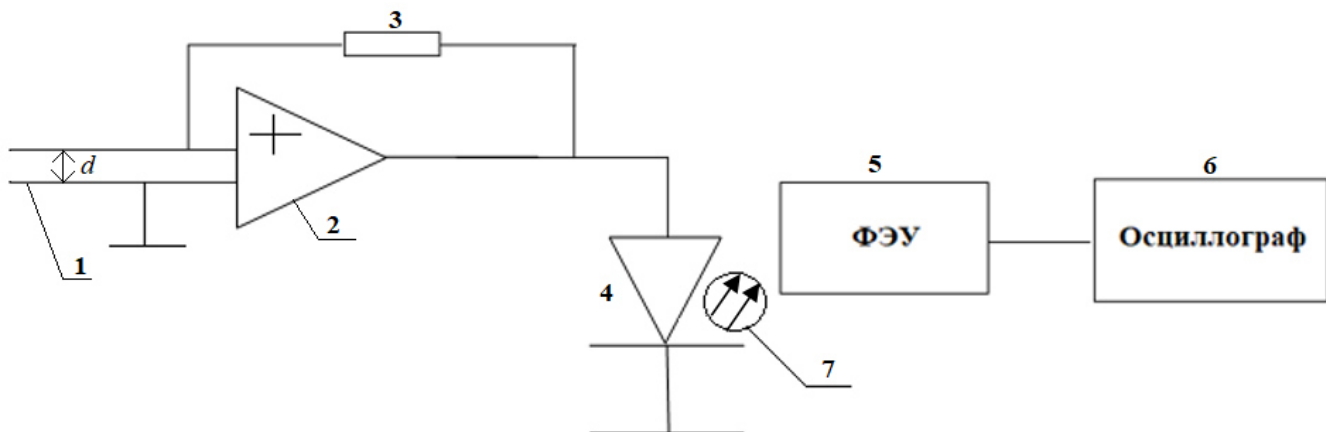


Рис. 10. Схема датчика напряжённости: 1 – датчик; 2- операционный усилитель; 3 – обратная связь; 4 – диод; 5 – фотоэлектронный умножитель; 6 – осциллограф; 7 – световод.

Когда однородное электрическое поле E действует перпендикулярно поверхности пластин, разность потенциалов индуцируются на верхней и нижней пластине соответственно. Эту разность усиливает операционный усилитель, который преобразует входной сигнал до такого уровня, чтобы выходной сигнал мог управлять яркостью светодиода, который расположен на датчике. Свечение светодиода передается на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) по световоду, который обеспечивает мобильность датчика относительно

ФЭУ, после чего сигнал с ФЭУ подаётся на осциллограф. Также у датчика имеется собственная батарейка, она используется для работы светодиода и операционного усилителя. Такая конструкция даёт нам возможность максимально отвязаться от внешних потенциалов. Датчик располагался на подвижной опоре, которая позволяла регулировать его положение по оси X и Z (рис. 11). Стоит отметить, что датчик перестраиваемый, то есть можно изменять пределы измеряемого поля.

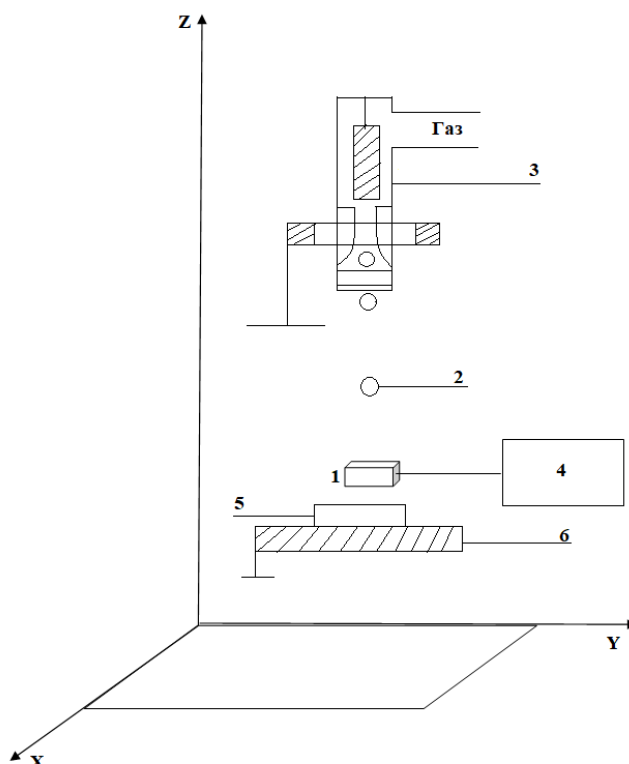


Рис. 11. Схема работы: 1 – датчик; 2 – сгустки плазмы; 3 – генератор плазмы; 4 – осциллограф; 5 – мисочка с водой; 6 – дополнительный заземлённый электрод.

Перед началом измерений датчик был откалиброван при помощи системы электродов с известной напряженностью поля между ними. Поле создавалось двумя пластинами большой площади, что позволяло предположить равномерность распределения поля между ними. После внесения датчика в пространство между пластинами, снимались показания осциллографа и сопоставлялись с известными данными.

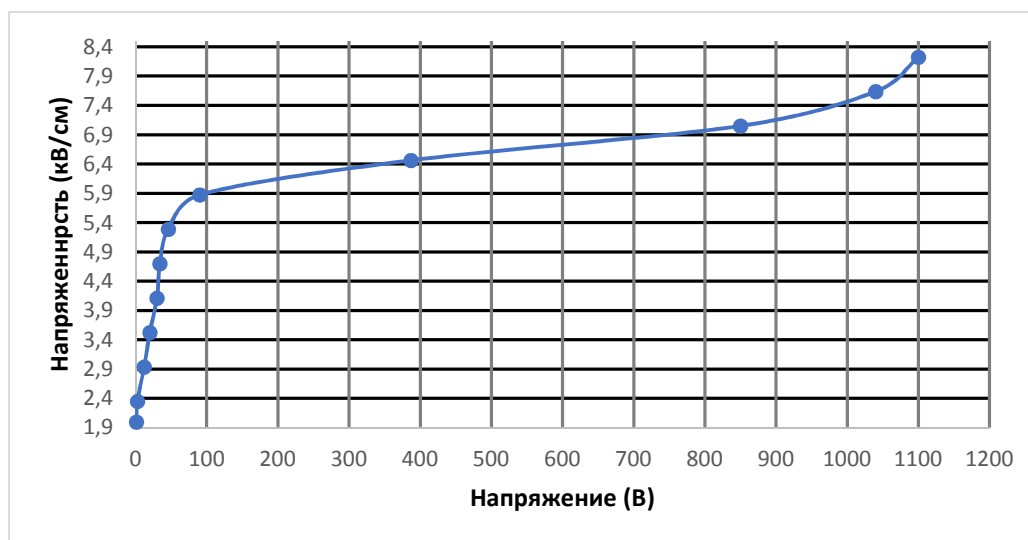


Рис. 12. График калибровочной кривой

На рис. 12 изображена калибровочная кривая. По оси абсцисс – напряжение на осциллографе, по оси ординат – напряженность поля.

Электроды подключались к генератору напряжения 1 (рис.1) вместо разрядной структуры. Увеличивая амплитуду напряжения от 0,75 до 3,5 кВ, с шагом в 0,25 кВ, снимались показания осциллографа, к которому был присоединён датчик. Для построения калибровочной кривой была подсчитана величина напряженности по формуле (5):

$$E = \frac{U}{d}, \quad (5)$$

где U – амплитуда напряжения; d – расстояние между пластинами.

4. Результаты

Эксперимент проводился следующим образом. На источнике напряжения выставлялось напряжение, в разрядную структуру подавался аргон со скоростью 3 л/мин, датчик подносился перпендикулярно плазменной струе на расстояние 5 мм от сопла; это положение считалось началом координат. Далее, датчик перемещали по одному миллиметру по оси X , как изображено на рис. 11. Изменив положение датчика, фиксировали показания осциллографа, после чего снова двигали датчик. Измерения продолжались таким образом, пока датчик был способен регистрировать наличие поля, т. е. пока значения на осциллографе не были нулевыми. После этого датчик возвращался в начало координат и с помощью регулирующей ножки, на которой располагался датчик,

сдвигался по оси Z вниз и снова проводились измерения. Все действия, описанные выше, проводились в «свободном пространстве», т. е. при отсутствии дополнительных земляных электродов и водной поверхности в системе. Следующим шагом было добавление в систему земляной пластины, расположенной перпендикулярно направлению распространения плазменной струи, над которой располагался датчик, после чего измерения проводились по такому же алгоритму. Последним шагом было добавление мисочки с водой, которая помещалась на поверхность земляной пластины, после чего датчик устанавливался в одно из двух положений: у сопла или у поверхности воды и снова снимались показания осциллографа.

Графики зависимости напряженности поля от расстояния строились при помощи калибровочной кривой. Показания напряжения, полученные с осциллографа, сравнивались с калибровочной кривой, в результате чего мы сразу получали значение напряженности поля в данной точке.

Ось X выбрана перпендикулярной экспериментальному стенду из-за конструктивных особенностей генератора плазмы и расположения его токоведущих частей, которые в выбранном направлении оказывают наименьшее влияние на проводимые измерения.

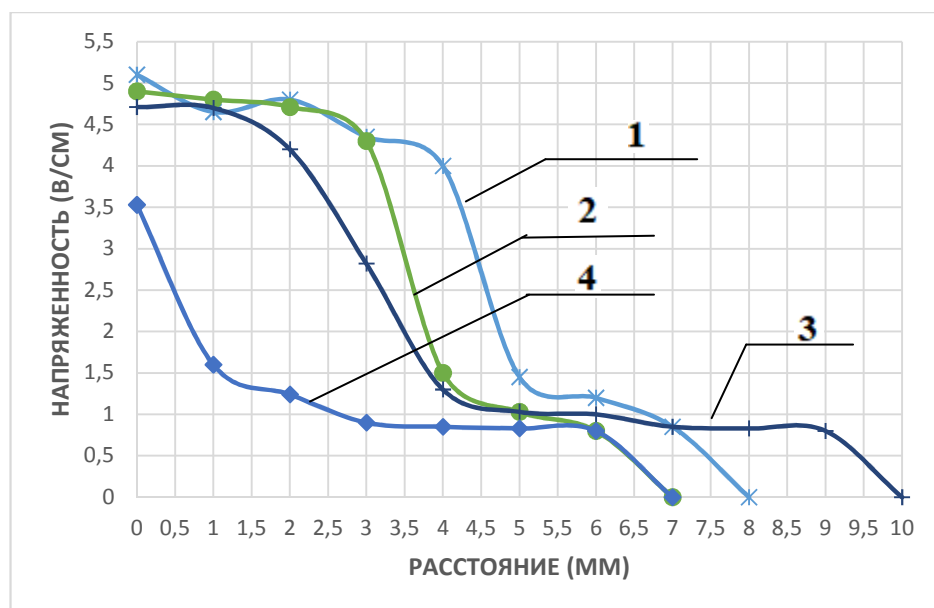


Рис. 13. График распределения электрического поля при $U = 2,75$ кВ в свободном пространстве.

В первом эксперименте (рис.13) использовалась методика, описанная выше: поместили датчик вплотную к струе, что обозначалось как 0 мм до сопла (кривая 1), и перемещали по оси X по 1 миллиметру, фиксируя значения на осциллографе. После этого вернули датчик в начало координат, сдвинули на 1 миллиметр по оси Z (кривая 2) и снова снимали показания. Затем в первый раз сдвинули на 5 мм по оси Z (кривая 3), после чего снова сдвинули на 5 мм по Z (кривая 4), повторяя ту же схему действий. Из графика видно, что с увеличением сдвига по оси Z, поле спадает быстрее: если на кривой 1 сильное падение поля начинается в окрестности 4 см, то на кривой 3 поле начинает сильно падать уже на 2 см.

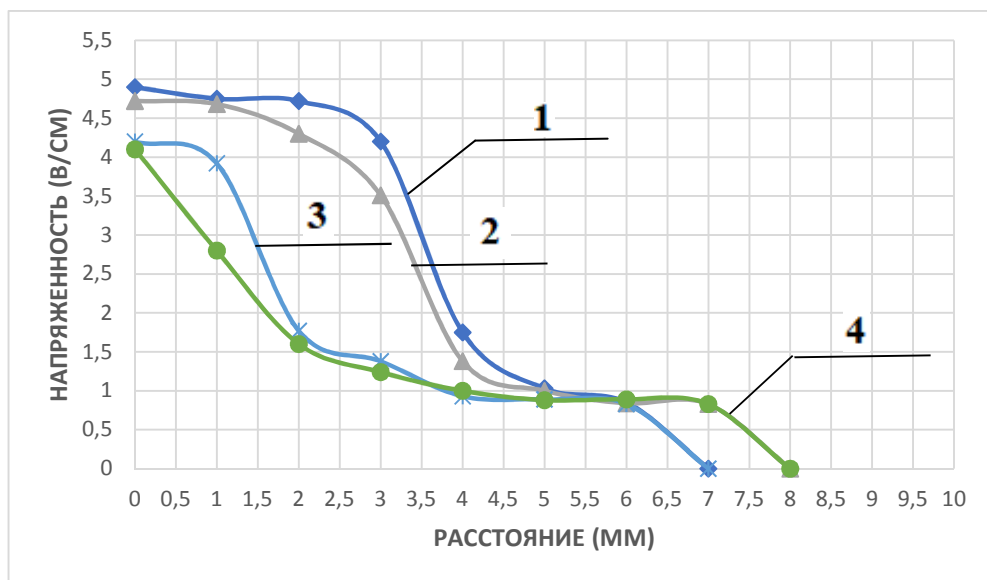


Рис. 14. График распределения электрического поля при $U = 2,75$ кВ с использованием дополнительного земляного электрода.

Во втором эксперименте, результаты которого изображены на рис. 14, использовался точно такой же подход, как и в первом эксперименте. Кривая 1 соответствует положению датчика 0 мм до сопла, кривая 2 — 1 мм, кривая 3 и 4 — 6 мм и 11 мм соответственно.

Согласно рис. 14, добавление земляной пластины увеличивает величину напряженности поля по оси X: среднее величина напряженности выше, чем в свободном пространстве. Это обусловлено тем, что расстояние между плазменной струей и поднесённой пластины много меньше, чем расстояние до заземлённого кольца и поле сильнее концентрируется в этой области.

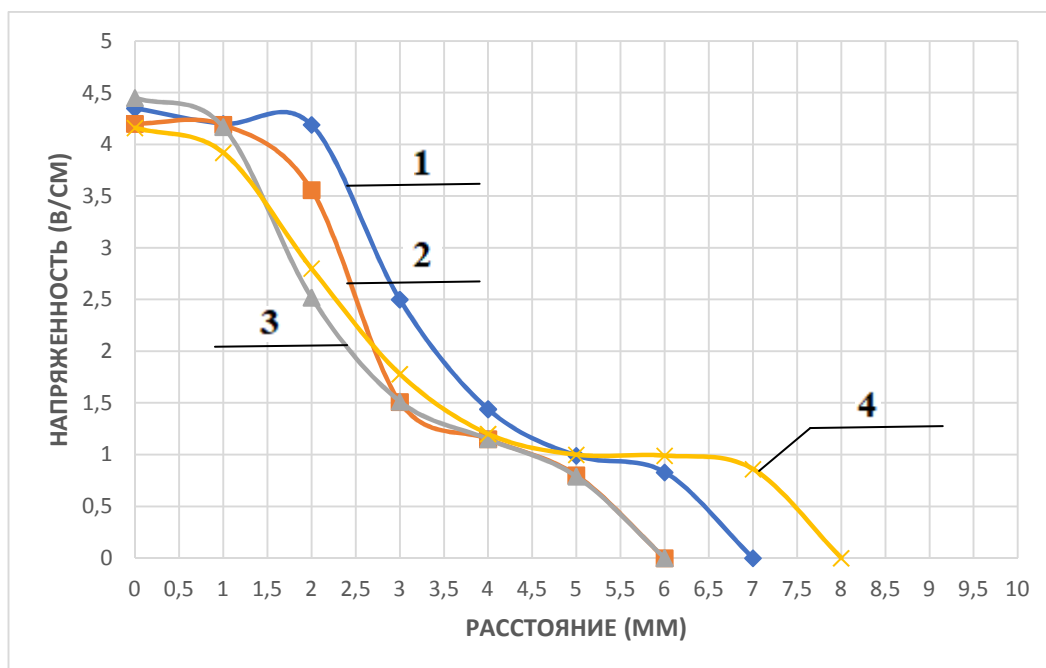


Рис. 15. График распределения электрического поля при $U = 2,75$ кВ с использованием дополнительного земляного электрода и водной поверхности.

Третий эксперимент (рис. 15) выполнялся по изменённой схеме: датчик помещался в одно из двух положений: у сопла или у поверхности воды. Использовались две различные конфигурации электродов: плазменная струя взаимодействовала с поверхностью воды при наличии или отсутствии земляной пластины. Всего было произведено четыре измерения: датчик располагался у сопла без использования земляной пластины (кривая 1); датчик у поверхности воды без земляной пластины (кривая 2); датчик у сопла с использованием земляной пластины (кривая 3); датчик у поверхности воды с земляной пластиной (кривая 4).

Наличие воды в системе электродов увеличивает напряженность поля, предположительно, в силу повышенной концентрации водяных паров над поверхностью воды, которые вступают во взаимодействие с плазмой.

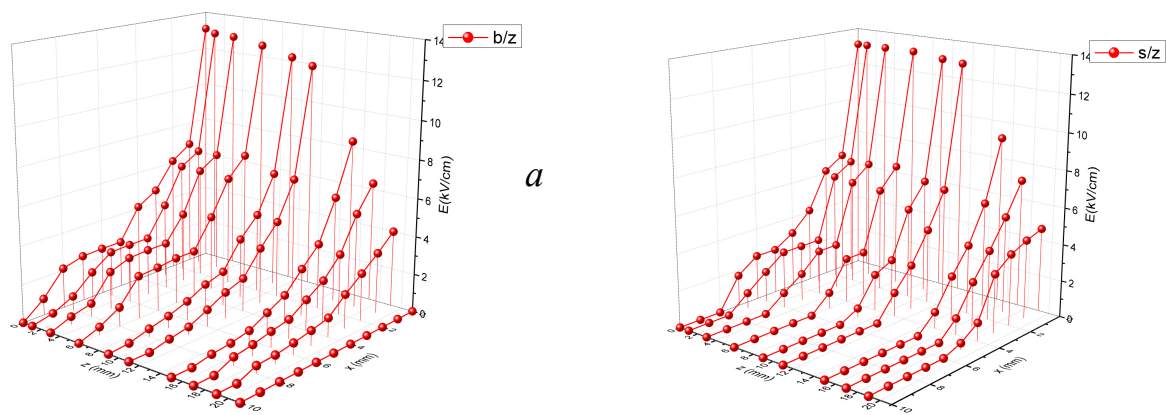


Рис. 16. График распределения электрического поля при $U = 4,5$ кВ: а – без заземлённого электрода; б – с заземлённым электродом.

На рис. 16 изображено распределение поля при напряжении в 4,5 кВ с разной конфигурацией электродов. Данные, использованные для построения рис. 16, были сняты с перестроенного датчика для обоснования наличия «полочки» - величины напряженности поля около нуля, которая присутствовала на рис. 13-15. Эта полочка обусловлена насыщением датчика. Дополнительные измерения проводились в два захода: со старой настройкой датчика и с новой таким образом, чтобы диапазоны полученных данных перекрывались на пару точек, что дало возможность убедиться в правильности сшивки результатов.

Из рис.16 видно, что при наличии заземлённого электрода, расположенного на пути распространения струи, поле, создаваемое головкой стримера, сосредоточено в более узкой области и затухает слабее при удалении от сопла. Это хорошо согласуется с расчётами, проведёнными в работе [1]. Однако абсолютные величины мгновенного значения поля и относительное его усиление при наличии мишени достаточно сильно расходятся. С одной стороны, это связано с тем, что моделирование проводилось для мгновенных значений, т. е. датчик, используемый для измерений, должен иметь бесконечную полосу пропускания. В выполненной работе применялся датчик с разрешением по времени ≈ 1 мкс. В дальнейших экспериментах датчик будет модернизирован с точки зрения временного разрешения и динамического диапазона. С другой стороны, в работе [9] абсолютные величины поля измерялись методом сдвига линий излучения. В этой работе демонстрируется

значительно меньшее влияние наличия мишени на напряженность поля головки стримера, достаточное близкое к результатам, полученным в данной работе.

5. Выводы

В ходе выполнения работы были измерены напряженность и радиус действия электрического поля, создаваемого плазменным стримером атмосферного давления в изменяемой системе электродов. Было выяснено, что напряженность поля зависит от конфигурации системы электродов, а также выдвинуто предположение, что взаимодействие плазмы с водяными парами над водной поверхностью оказывает влияние на распределение поля. Полученные в работе данные соотносятся с теоретическими расчётами об увеличении напряженности поля при добавлении земляной пластины, но не совпадают с расчётами об уменьшении напряженности поля у поверхности воды, что может быть связано с взаимодействием паров воды и плазмы [1]. Также наблюдается несовпадение по абсолютной величине: максимальным экспериментально полученным значением напряженности поля является величина порядка 15 кВ/см, что в свою очередь отличается от теоретического почти в 4 раза [1]. Это связано с неоднородностью поля плазменного стримера, а также характеристиками датчика напряженности. Следующим шагом для развития работы требуется модификация датчика, направленная на уменьшение его размеров и увеличение полосы пропускания и его динамического диапазона.

6. Список литературы

1. Schweigert I., Zakrevsky Dm., Gugin P., Yelak E., Golubitskaya E., Troitskaya O., Koval O.: Interaction of Cold Atmospheric Argon and Helium Plasma Jets with Bio-Target with Grounded Substrate Beneath. -2019. –
2. Keidar M., Walk R., Shashurin A., Srinivasan P., Sandler A., Dasgupta S., Ravi R., Guerrero-Preston R., Trink B.: Cold plasma selectivity and the possibility of a paradigm shift in cancer therapy. -2011.-
3. Лёб. Л.: Основные процессы электрических пробоев в газах: Пер. с англ. М-Л., 1950

4. А. М. Прохоров: Физическая энциклопедия. Том 4. – Большая Российская Энциклопедия, 1994.
5. XinPei Lu, Mounir Laroussi: Journal of Applied Physics 100, 06302 (2006); doi: 10.1063/1.2349475
6. Бирюков С. В., Щапова Л. В.: Датчик напряженности электрического поля в виде плоской проводящей пластины в форме квадрата. Омск, 2017
7. Нейман Л. Р., Демирчан И. С.: Теоретические основы электротехники. В 2-х т. Т. 2. М., Л.: Энергия, 1966
8. Бессонов Л. А.: Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1978.
9. Marlous Hofmans, Ana Sobota: Influence of a target on the electric field profile in a kHz atmospheric pressure plasma jet with the full calculation of the Stark shifts, J. Appl. Phys. 125, 043303 (2019); doi; 10,1063/1.5075544