



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени М. В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

НАУЧНЫЙ ПРОЕКТ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАПИЛЛЯРНОГО
РАЗРЯДА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С
МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПРЕГРАДАМИ**

Выполнил студент

423 группы

Байдак Владимир Алексеевич

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., в.н.с. Бычков Владимир Львович

Москва 2021

ВВЕДЕНИЕ

Во второй половине 20 века в связи с исследованиями плазменных разрядов различного типа в атмосфере появились такие понятия, как «долгоживущие плазменные образования» (ДПО) и «долгоживущие светящиеся образования» (ДСО). Это светящиеся объекты, получаемые в разрядных экспериментах при создании особо ярких источников излучения, а также при исследовании воздействия плазмы на различные материалы. Под словом «долгоживущие» образования подразумевается тот факт, что время их существования (например, время свечения) намного превышает их характерное время создания при помощи какого-либо источника плазмы. Другой их особенностью является их автономность, то есть способность свободно перемещаться в пространстве, сохраняя свою форму, размер и цвет в течение времени, сравнимого с временем существования. По мнению авторов [1], этот набор свойств типичен для шаровой молнии (ШМ). Вследствие этого, они заявили, что поток эрозивной плазмы является лабораторным аналогом ШМ. Эта аналогия выглядит достаточно искусственной (и должна вызывать активный протест у тех, кто видел настоящие ШМ), поскольку поток движущейся плазмы ни по форме, ни по характеру движения никак не напоминает ШМ. Тем не менее аналогия, заявленная в [2], была безоговорочно принята другими исследователями.

Наиболее простым способом получения ДСО является электрический разряд в канале с испаряющимися стенками (эрозионный разряд), который позволяет получать энергоёмкие плазменные образования (ЭПО). Плазменный поток, который выбрасывается из канала, имеет плотность, близкую к плотности воздуха, соответственно низкую температуру и небольшую интенсивность излучения, высокую плотность энергии и большую концентрацию заряженных частиц.

Целью настоящей работы является детальное исследование параметров плазменной струи, создаваемой капиллярным плазмотроном, при взаимодействии с различными металлическими преградами, а также изучение возможности создания энергетических добавок для применения их в плазменной аэродинамике.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Капиллярный плазмотрон, или эрозионный плазмотрон – наиболее известный тип плазмотронов, для получения долгоживущей плазмы и ДСО [3]. Принципиальная схема этого плазмотрона представлена на рис. 1.

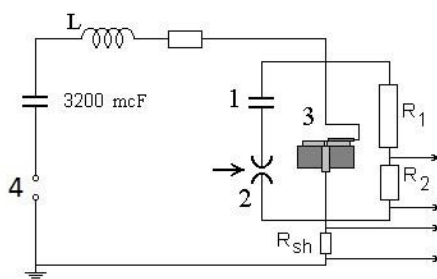


Рис. 1. Общая схема капиллярного плазмотрона. 1 – иницирующая ёмкость, 2 – коммутатор, 3 – капилляр, R_1 , R_2 – сопротивления делителя напряжения, R_{sh} – сопротивление шунта для определения тока разряда.

Она представляет собой цепь, включающую в себя коммутатор, ёмкость и разрядное устройство, в состав которого входят плоские электроды, разделённые диэлектриком с капилляром (Рис. 2).

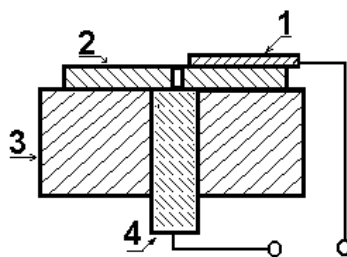


Рис. 2. Эрозионный плазмотрон. 1,4 – электроды, 2 – диэлектрическая пластина с капилляром (разрядная камера), 3 – основание плазмотрона изолятор.

Рассмотрим кратко принцип действия капиллярного плазмотрона. В начале накопительная ёмкость (1 рис. 1) заряжается от источника питания до напряжения порядка 300 В, при таком напряжении самопробой капилляра не наблюдается. В определённый момент от системы синхронизации подаётся высоковольтный импульс запуска (4 рис. 1). В результате происходит пробой капилляра, при этом накопительная ёмкость разряжается через капилляр, что приводит к образованию плазменного канала в капилляре. Рост тока приводит к нагреву плазмы в капиллярном разряде, при этом давление внутри капилляра возрастает и происходит выброс плазменной струи из капилляра. Процесс токового нагрева плазмы в капилляре происходит достаточно быстро (за время порядка нарастания тока), что приводит к росту скорости истечения плазменной струи из капилляра.

Капиллярный плазмотрон обладает следующими характеристиками: длительность импульса 7 мс, энергия в импульсе 200-220 Дж, напряжение на разрядном промежутке 300-310 В, максимальное значение тока в импульсе 100-120 А.

Значение коэффициента деления делителя напряжения, состоящего из сопротивлений R_1 и R_2 , используемого для снятия зависимости напряжения на разрядном промежутке от времени: 1 к 100. Сопротивление шунта $R_{ш}$ – 0,013 Ом.

Для получения разряда использовался капилляр из оргстекла диаметром 2 мм и длиной 4,5 мм, который представляет собой разрядную камеру.

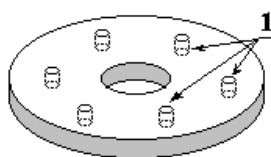
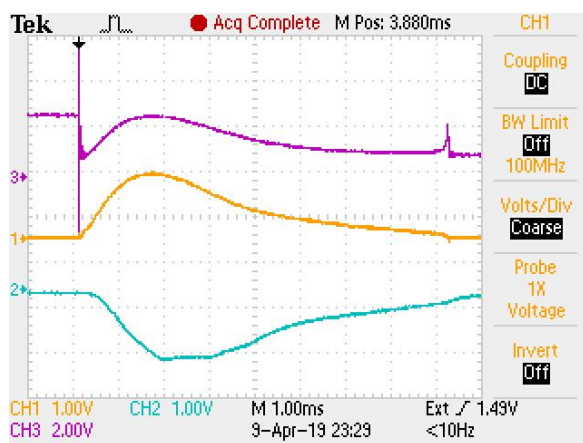


Рис. 3. Разрядная камера капиллярного плазмотрона. 1 – капилляры.

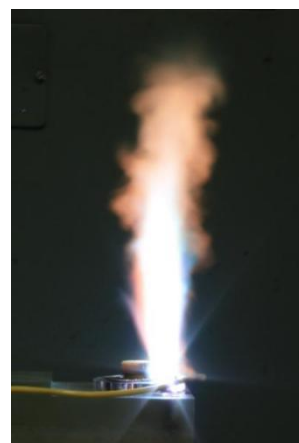
Нижний электрод был выполнен из сплава вольфрама с медью (ВДПМ), верхний электрод был медный, остальные элементы конструкции плазмотрона были выполнены из оргстекла. Запуск плазмотрона осуществлялся генератором импульсов Г5-15.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе эксперимента получены осциллограммы, типичный пример которых приведён на рис. 4 а. При этом, на осциллографе регистрировались: сигнал с делителя напряжения (3 канал), сигнал с шунта (1 канал) и сигнал свечения разряда, полученный при помощи ФЭУ (2 канал). Также были получены интегральные по времени и спектру фотографии плазменной струи, созданной капиллярным разрядом (рис. 2).



а



б

Рис. 4. а - пример осциллограммы для оргстекла: 1 канал – ток, 2 канал – свечение (инвертирован), 3 канал (инвертирован) – падение напряжения. Длительность развёртки 1 мс на большое деление.

б - типичные фотографии плазменной струи, созданной капиллярным плазмотроном

На основании обработки осциллограмм были получены максимальные значения тока разряда - 112 А, падения напряжения - 192 В и светимости плазменного образования - 1,6 отн. ед. При длительности импульса в 7 мс получаем, что в ЭПО вкладывается энергия примерно равная 150 Дж. Также на основе полученной фотографии разряда были определены: максимальная длина плазменной струи вдоль оси её распространения - 125 ± 10 мм, максимальная высота канала ЭПО - 80 ± 10 мм и диаметр канала - 14 ± 2 мм.

Эти параметры, к сожалению, не дают представления об области максимального энерговыделения, знание которой необходимо при рассмотрении приложений. С целью её определения проделаны следующие эксперименты.

Первая серия экспериментов посвящена взаимодействию плазменной струи с металлическими мишенями. Эксперимент проводился следующим образом: мишени из разных материалов размером 40×40 мм располагались на разных высотах от капилляра так, чтобы центр мишени совпадал с осью ЭПО. В результате взаимодействия на определённых высотах мишени прожигались. Диаметры отверстий, полученных в результате взаимодействия струи с мишенями разных толщин, представлены в Таблице 1, см. ниже.

Таблица 1

Высота положения мишени		1 см	2 см	3 см	4 см	5 см	6 см	7 см	10 см
Диаметры отверстий	Алюминий (10 мкм)	10 мм	10 мм	11 мм	11 мм	9 мм	нп	нп	нп
	Алюминий (200 мкм)	4 мм	нп	нп	нп	нп	нп	нп	нп
	Медь (150 мкм)	5 мм	2 мм	нп	нп	нп	нп	нп	нп
	Медь (300 мкм)	нп	нп	нп	нп	нп	нп	нп	нп
	Бумага (120 мкм)	нп	нп	нп	нп	нп	нп	нп	нп

Примечание: «нп» - нет прожига

При прожиге металлических мишеней наблюдался взрывной быстротекущий процесс, по виду мишеней после взаимодействия можно сделать вывод, что шёл не только процесс плавления, но и кипения. Для металлов, представленных выше, получается, что температура ядра ЭПО достигает 3000 К (температура кипения). Продукты разрушения в виде светящихся частиц разного размера уносились в направлении распространения ЭПО.

Таким образом, ЭПО взаимодействует с металлами очень интенсивно на близких расстояниях от эжектора - области истечения струи из плазмотрона. Интегральные по времени и спектру фотографии взаимодействия плазменной струи с алюминиевой фольгой (толщина - 10 мкм), расположенной на разных расстояниях от капилляра, представлены на рис. 5.

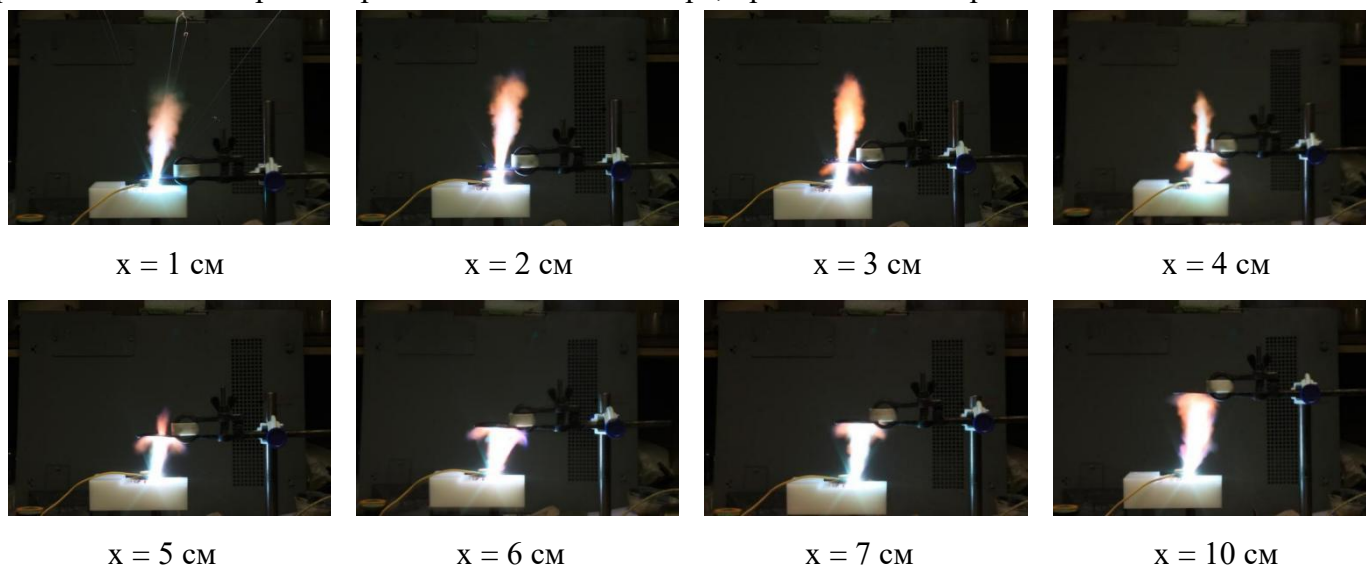


Рис. 5. Формы струи при взаимодействии с мишенями, находящимися на разных расстояниях x .

В случае более толстых (для меди - 300 мкм, для алюминия - 600 мкм) мишеней из электропроводных материалов, прожига на расстоянии 1 см не наблюдалось. Прожжённые отверстия имеют круглую форму. Типичные фотографии взаимодействия ЭПО с мишенями представлены на рис. 6.

Алюминий (толщина - 200 мкм)

Бумага (толщина - 120 мкм)

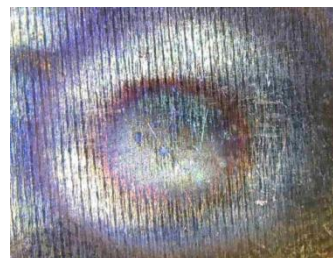
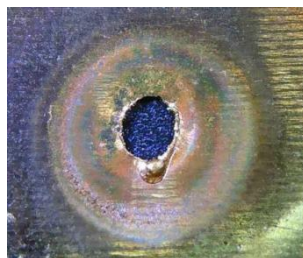
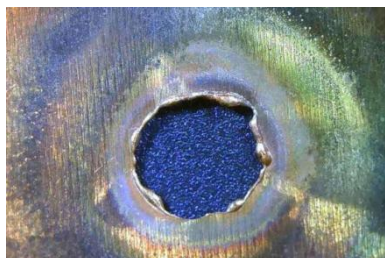


высота - 1 см

высота - 2 см

высота - 1 см

Медь (толщина - 150 мкм)



высота - 1 см

высота - 2 см

высота - 3 см

Рис. 6

Прожиг металла начинается с центральной части, где температура образца поднимается до температуры испарения, порядка 3000 К.

По размерам отверстий в мишенях различной толщины были также сделаны оценки энергий, переданных от ЭПО, мишеням. Они представлены в Таблице 2, см. ниже.

Таблица 2

Материал	Вложенная энергия на различных расстояниях x до мишени, Дж				
	$x = 1$ см	$x = 2$ см	$x = 3$ см	$x = 4$ см	$x = 5$ см
1. Алюминий (10 мкм)	4,8	4,8	5,8	5,8	3,9
2. Алюминий (200 мкм)	15,3	нп	нп	нп	нп
3. Медь (150 мкм)	25,6	4,1	нп	нп	нп

Примечание: «нп» - нет прожига

Будем считать, что энергия, выделившаяся в керне – области кипения металла, идёт только на испарение металла. Сделаем оценку этой энергии. В случае 1 (см. таблицу 2) она составляет 25.1 Дж, или 17% от вложенной мощности. В случае 2 она составляет 10% от вложенной мощности и в случае 3 она составляет 17% от вложенной мощности. Оставшаяся энергия идёт на плавление и излучение. Таким образом, полученные результаты показывают, что энергия, которая передаётся от ЭПО к мишеням, составляет около 17% от вложенной в разряд энергии.

Кроме того, на рис. 6 представлен результат взаимодействия ЭПО на диэлектрический материал - бумагу. Как видно ЭПО не прожигает бумагу толщиной 120 мкм, приставленную вплотную к разряднику, а оставляет след в виде лёгкого обугливания поверхности мишени (желтоватого цвета). Возгорание бумаги происходит лишь после четырёх разрядов. Это можно объяснить тем фактом, что при нагреве поверхности бумаги плазмой разряда происходит быстрая сублимация материала бумаги, приводящая к появлению паров разложения бумаги вблизи её поверхности. Покрывая поверхность бумаги, пары рассеивают плазму и не позволяют ей рекомбинировать на поверхности бумаги и выделять энергию на поверхности.

В следующей серии экспериментов прямо над капилляром плазмотрона размещались проволочки из образцов олова двух диаметров - 0,9 мм и 1,5 мм. Нижняя часть проволоки (длиной ~ 0.3-0.5 мм) нагревалась и оплавлялась. Кроме того, из тонкой проволоки вместе со струёй, по направлению её распространения, вылетали маленькие шарики олова (диаметром 0,2-2,8 мм), которые отлавливались в ванночках с водой.

Время свечения таких шариков составляло от 100 мс до 2 с. Во время экспериментов было зарегистрировано, что некоторые образующиеся шарики могут прыгать по поверхности воды, оставляя некоторую плёнку на её поверхности (рис. 7 в). Одним из возможных объяснений данного явления может служить следующее: так как материал шарика имеет температуру больше 1000 К, то при приближении к поверхности воды происходит испарение воды, которая охлаждает его поверхность, при этом конденсирующиеся пары вступают в химическую реакцию с кипящим металлом на поверхности шарика и выпадают в виде плёнки. Одновременно создаётся паровая подушка, которая не даёт шарика упасть в воду некоторое время, пока он или не разрушится, или не охладится, после чего погрузится в воду. Помимо шариков вместе со струёй вылетали более мелкие продукты мишени, которые сгорали в воздухе. Фотографии данного эксперимента представлены на рис. 7.

В среднем масса шарика составляет 0,1 мг, а энергия, затраченная на плавление этого шарика из олова с последующим выбросом, составляет 4,8 Дж. Учитывая диаметр шарика в 1,5 мм, получаем, что плотность энергии составляет $3,5 \cdot 10^8$ Дж/м³. Эта плотность энергии больше типичной плотности энергии при горении углеводородов, что говорит о возможности использовать получение энергоёмких структур при активации топлива в плазмо-аэродимических экспериментах.

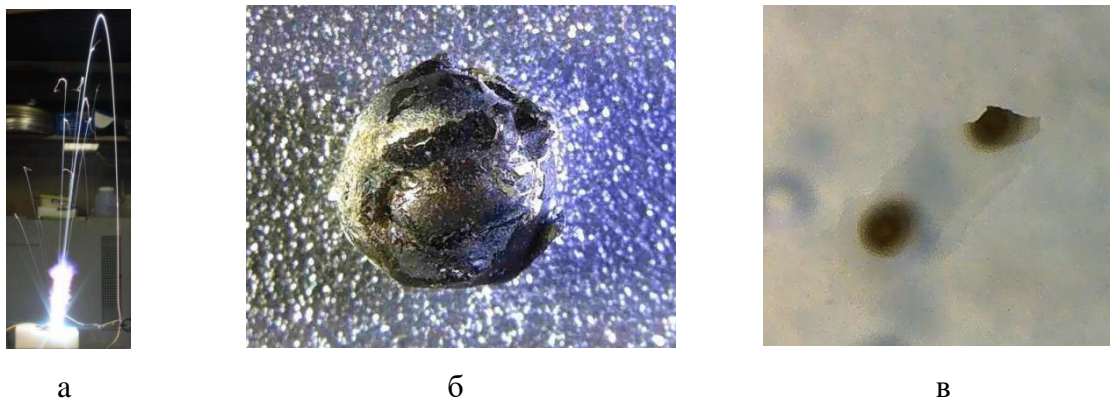


Рис. 7. а - фотография взаимодействия плазменной струи с проволокой; б - шарики, представляющие собой «неправильный» шар; в - следы шара, оставленные на поверхности воды

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Энергоёмкие плазменные образования эффективно взаимодействуют с металлами и слабо с диэлектриками.
2. В процессе взаимодействия ЭПО с металлическими образцами наблюдаются образования энергоёмких плазменных объектов с удельными энергиями, сравнимыми с энергией горючих веществ.
3. Время жизни таких образований составляет от 100 мс до 2 с.

Эти результаты показывают перспективность использования капиллярных разрядов для создания энергоёмких добавок в плазменной аэродинамике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авраменко Р.Ф., Николаева В.И., Поскачеева Л.П. Энергоёмкие плазменные образования, инициируемые эрозионным разрядом, - лабораторный аналог шаровой молнии. Шаровая молния в лаборатории п/ред. Авраменко Р.Ф., Бычкова В.Л., Климова А.И., Синкевича О.А. Москва. Химия. 1994. С.15-66.
2. Ершов А.П., Розанов В.В., Сысоев Н.Н., Тимофеев И.Б., Чувашев С.Н., Шибков В.М. Физическая гидродинамика. Вып.4. Экспериментальные исследования дозвуковых плазменных струй. Структура, свойства, взаимодействие с металлами. Препринт физического факультета МГУ, 1994 г., № 8/1994, 34 С.
3. Авраменко Р.Ф., Бахтин Б.И., Николаева В.И., Поскачеева Л.П., Широков Н.Н. Экспериментальное исследование плазменных образований, инициируемых эрозионным разрядом. Журнал Технической Физики. 1990. Т.60, вып.12, с. 73-78.
4. Ершов А.П., Тимофеев И.Б., Чувашев С.Н., Быцкевич С.П. Эволюция структуры и параметров плазменной струи с импульсной инжекцией в атмосферу. Теплофизика Высоких Температур. 1990. Т. 28. Вып. 3. с. 583-589.
5. Александров А.Ф., Исаев К.Ш., Черников В.А. Излучение и химический состав эрозионной плазмы, истекающей в воздух. Теплофизика Высоких температур. 1990. Т. 28. Вып. 5. с.833-842.
6. Кунин В.Н., Плешивцев В.С., Фуров Л.В. Эксперименты по исследованию природы шаровой молнии. Теплофизика Высоких температур. 1997. Т.35. № 63. С.866-870.