

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Семенов Тимофей Игоревич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**ВАХ плазмотрона линейной схемы ПНК-10 с межэлектродной вставкой
с каналом анода с конусообразным расширением.**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19303

Научный руководитель:

К.ф.-м.н., Е.В.Картаев

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

К.ф.-м.н. А.А.Симонов

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 20__ г.

Куратор практикума:

__ к.т.н. В.Т. Астрелин _____

Итоговая оценка

« _____ » _____ 20__ г.

Новосибирск 2020 г.

Аннотация

Исследованы ВАХ плазматрона пнк-10 для разных расходов газов. При помощи вольтметров м-105 и м-42-100, получена зависимость напряжения плазмообразующей дуги от тока. Произведен анализ данных, из которого получены: аппроксимации ВАХ для разных расходов газов, примерные формулы дифференциального сопротивления плазмообразующей дуги от тока дуги, аппроксимация зависимости тока срыва дуги от расхода газа, аппроксимация зависимости средней напряженности поля от расхода газа, а также погрешности.

1. Оглавление	
2. Введение:	3
2.1 Линейный плазмотрон пнк-10.....	3
2.2 Схема и принцип действия плазматрона пнк-10.....	3
2.3 Схема анода плазматрона пнк-10.....	3
2.4 Ряд проблем плазмотронов.....	4
2.5 Решения проблем плазматронов	4
3. Задачи и цели	4
4. Методика работы	5
5. Теоретическая часть	5
5.1 Типы линейных плазматронов	5
5.2 ВАХ линейных плазмотронов.....	6
5.3 Вывод формулы для расчета напряжения	6
5.4 Вывод формулы для расчета тока	6
5.5 Средняя напряженность поля.....	6
5.6 Дифференциальное сопротивление дуги.....	7
6. Расчеты	7
6.1 ВАХ плазматрона	8
6.2 Дифференциальное сопротивление дуги:.....	8
6.3 Зависимость тока срыва дуги	9
6.4 Зависимость средней напряженности поля	10
7. Погрешности	10
7.1 Погрешность измерения напряжения	10
7.2 Погрешность измерения тока.....	11
7.3 Погрешности ВАХ.....	11
7.4 Погрешность среднего значения поля	11
8. Выводы	12
9. Список литературы	13

2. Введение

2.1 Линейный плазмотрон с МЭВ ПНК-10 служит в качестве источника низкотемпературной плазмы, используемой для проведения высокотемпературных химических реакций синтеза нанокompозитных порошков оксидных керамик, относящихся к новому классу материалов с возможностью управления их физикохимическими свойствами в зависимости от предназначения.

2.2 Схема и принцип действия:

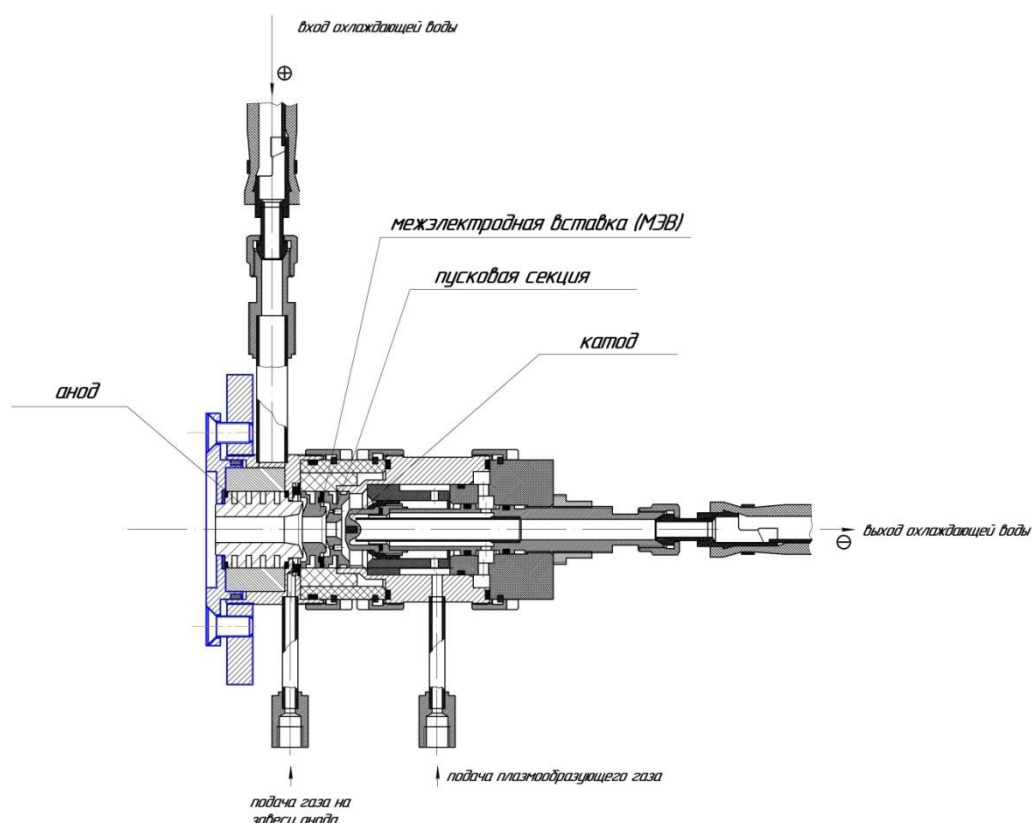


Рис.1 Схема плазмотрона пнк-10.

Плазмообразующий газ (азот) подается на катод, далее он «поджигается» и образуется плазменная дуга, далее подается защитный газ (завеса), который способствует поджатию дуги – увеличивает температуру и напряженность поля.

2.3 Схема анода.

Благодаря конусообразному аноду, площадь привязки пятна дуги уменьшается, и дуга стягивается вверх к более узкой части. Так как напряжение пропорционально длине дуги - это приводит к увеличению значений температуры, напряженности поля и интенсивности.

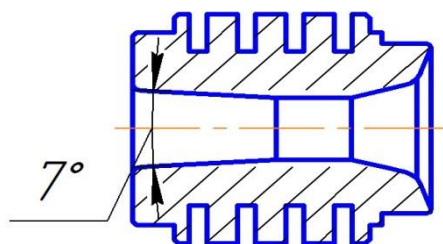


Рис.2 Схема анода плазматрона.

2.4 Выделяют ряд проблем плазматронов:

- Эрозия катода и анода
- Шунтирование (низкочастот.) — укорачивание дуги в результате локального пробоя в канале. ВАХ плазматрона падающая, слабо падающая - рис.4. Значит, увеличение силы тока ведет к более частому шунтированию дуги, и как следствие пульсациям напряжения.
- Вынесение дуги за пределы анода

2.5 И ряд решений проблем:

- Проблема с эрозией решается высококачественными материалами, но все же это может только увеличить количество времени эксплуатации, но не полностью избавиться от этой проблемы.
- Одним из решений проблемы срыва дуги является использования межэлектродной вставки, с помощью которой можно уменьшить длину анода, сохраняя величину средней напряженности поля. За счет уменьшения площади анода, дуга устанавливается в меньшей по площади зоне, а значит - становится более стабильной.
- Проблему с вынесением дуги за пределы анода можно решить, используя конусообразную форму или любую другую, чтобы диаметр середины анода был меньше диаметра ее торца.

3. Задачи и цели

С помощью ВАХ можно получить большинство характеристик плазматрона, для будущего использования под конкретные задачи, а также оптимизировать расход газа и энергии.

Цель данной работы - найти зависимости:

- Вольт-амперной характеристики плазматрона
- Тока срыва дуги от расхода
- Средней напряженности поля дуги от расхода газа
- Температуры дуги от напряжения

4. Методика работы

В эксперименте используется следующее оборудование: вольтметр м-105 с классом точности 0,5, вольтметр м-42-100 с классом точности 1,5. Далее для удобства будем обозначать вольтметры - V_1 , V_2 соответственно.

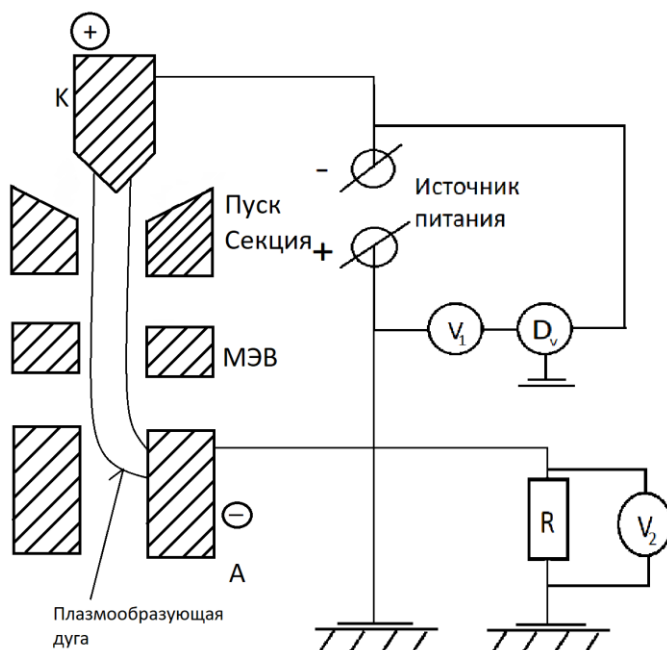


Рис.3. Электрическая схема установки, где V_1 , V_2 – вольтметры, R – сопротивление, K – катод, A – анод. D_V – делитель напряжения с коэффициентом $\frac{1}{2}$. МЭВ – межэлектродная вставка.

5. Теоретическая часть

5.1 Типы линейных плазматронов:

- Плазматроны с самоустанавливающейся средней длиной дуги. Она зависит от силы тока, полярности выходного электрода, расхода и рода рабочего газа, давления в камере, и её диаметра. Механизмом установления длины дуги является крупномасштабное шунтирование. Плазматроны этого класса имеют падающую вольт-амперную характеристику.
- Плазматроны с фиксированной, то есть постоянной в достаточно широком диапазоне изменений тока, средней длиной дуги, меньшей самоустанавливающейся. Такие плазматроны имеют U – образную форму ВАХ. На восходящем участке ВАХ реализуется устойчивое горение дуги без балластного сопротивления в электрической цепи, при КПД близком к единице.
- Плазматроны с межэлектродной вставкой также имеют постоянную длину дуги в широком диапазоне изменений силы тока. Однако, их длина дуги больше чем у плазматрона с самоустанавливающейся средней длиной дуги. Эти плазматроны имеют слабо падающую характеристику.

5.2 ВАХ линейных плазмотронов, в частности плазмотронов с МЭВ.

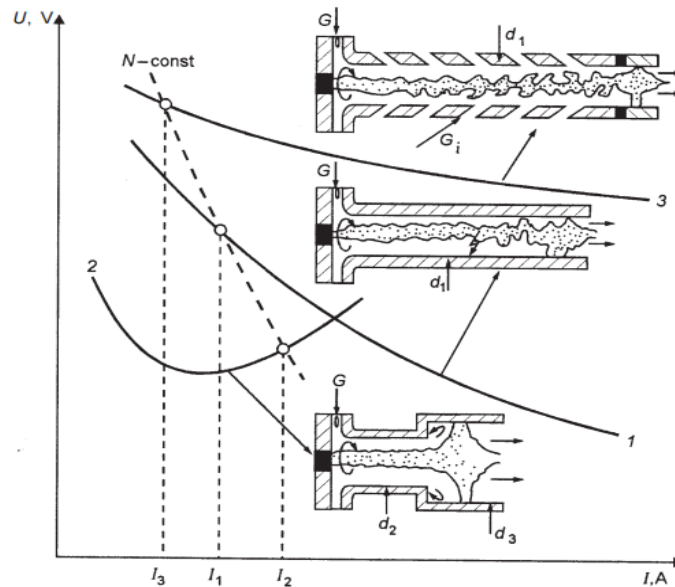


Рис.4. Характерный вид кривых ВАХ плазмотронов линейной схемы

(Сверху вниз): плазмотрона с межэлектродной вставкой, плазмотрона с самоустанавливающейся длинной дугой, плазмотрона со стабилизацией дуги уступом.

Как можно заметить ВАХ плазмотрона с МЭВ – слабо падающий, это и есть теоретическая модель ВАХ.

5.3 Так как на вольтметре V1 стоит делитель, то искомое напряжение будет равно:

$$V = 2V_1 - \text{напряжение}$$

5.4 Для измерения тока используется делитель тока, с сопротивлением R, достаточно малым чтобы примерно равняться сопротивлению проводов. Тогда ток протекающий через R – будет равен половине от искомого тока. Получим:

$$I = \frac{2V_2}{R} - \text{ток}$$

5.5 Средняя напряженность поля – E, равна частному разности потенциалов между катодом - U и анодом на расстояние между ними - d.

$$E = U/d$$

5.6 Дифференциальное сопротивление дуги будет равно:

$$R = \frac{U}{I}$$

$$R_{I_0} = \frac{dU(I_0)}{dI}$$

6. Расчеты

Таблица 1 ВАХ плазматрона, $G_{\text{раб.газ}}$ – расход рабочего газа, $G_{\text{защ.газ}}$ – расход защитного газа (завесы), $V1$ – напряжение вольтметра м-105, $V2$ – напряжение вольтметра м-42-100, V – напряжение плазменной дуги, I – ток плазменной дуги. Ток, помеченный **желтым** цветом, – ток срыва дуги. Напряжение, помеченное **зеленым** цветом, – далее используется для расчетов зависимости напряженности поля.

$G_{\text{раб.газ}}, \Gamma$ /с	$G_{\text{защ.газ}}, \Gamma$ /с	V1, В	V, В	V2, мВ	I, А
0,83	0,13			5,64	37,6
		95	190	6	40
		90	180	7,2	48
		84	168	8,4	56
		80	160	9,6	64
		76	152	10,8	72
		75	150	12	80
		72	144	13,2	88
1,04	0,13			6	40
		95	190	7,2	48
		93	186	8,22	54,8
		89	178	9,9	66
		85	170	10,8	72
		81	162	11,58	77,2
		80	160	12,78	85,2
		75	150	13,98	93,2
1,25	0,2			6,5	43,33
		100	200	7,2	48
		95	190	8,28	55,2
		93	186	9,24	61,6
		90	180	10,68	71,2
		86	172	11,88	79,2
		84	168	13,1	87,33
		83,5	167	13,7	91,33
0,63	0			5,35	35,67
		92	184	5,64	37,6
		88	176	6	40

		82	164	7,2	48
		76	152	8,4	56
		74	148	9,6	64
		70	140	10,8	72
		68	136	12	80
		65	130	12,84	85,6

6.1 ВАХ плазматрона при различных расходах газа

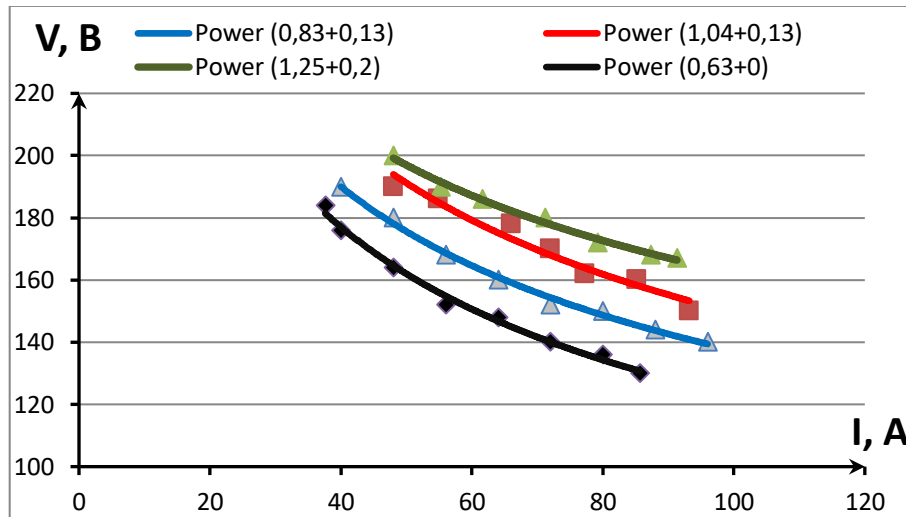


Рис.5 – ВАХ плазматрона при разном расходе газа. В скобках расход газа

Тогда формулы таких графиков, найденные из аппроксимации:

$$V \approx 770 * I^{-0,4} \text{ — для расхода } 0,63 + 0 \text{ г/с}$$

$$V \approx 701 * I^{-0,35} \text{ — для расхода } 0,85 + 0,13 \text{ г/с}$$

$$V \approx 764 * I^{-0,35} \text{ — для расхода } 1,04 + 0,13 \text{ г/с}$$

$$V \approx 589 * I^{-0,28} \text{ — для расхода } 1,25 + 0,2 \text{ г/с}$$

6.2 Дифференциальное сопротивление дуги:

$$R \approx 308 * I_0^{-1,4} \text{ — для расхода } 0,63 + 0 \text{ г/с}$$

$$R \approx 245 * I_0^{-1,35} \text{ — для расхода } 0,85 + 0,13 \text{ г/с}$$

$$R \approx 267 * I_0^{-1,35} \text{ — для расхода } 1,04 + 0,13 \text{ г/с}$$

$$R \approx 165 * I_0^{-1,28} \text{ — для расхода } 1,25 + 0,2 \text{ г/с}$$

Построим графики таких зависимостей:

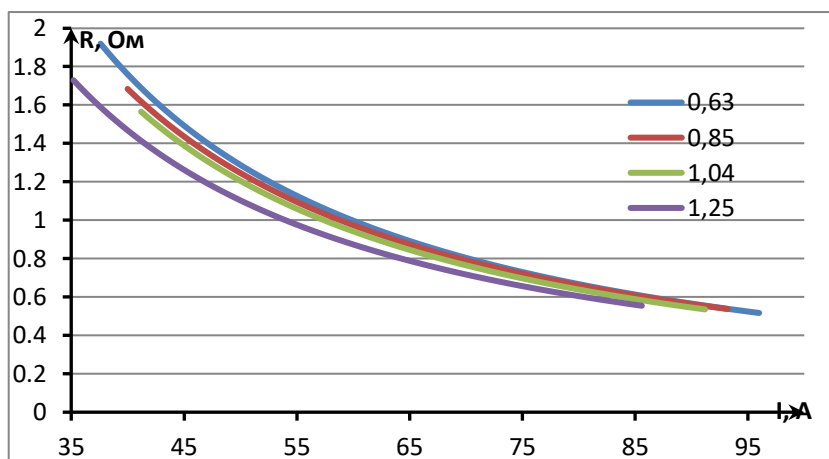


Рис.6. Графики дифференциальных сопротивлений дуги. С боку помечен расход рабочего газа.

Таблица 2. Зависимость тока срыва дуги от расхода рабочего газа.

$G_{\text{раб.газ}}, \Gamma$ /с	I, A
35,67	0,63
37,6	0,83
40	1,04
43,33	1,25

6.3 Зависимость тока срыва дуги от расхода рабочего газа.

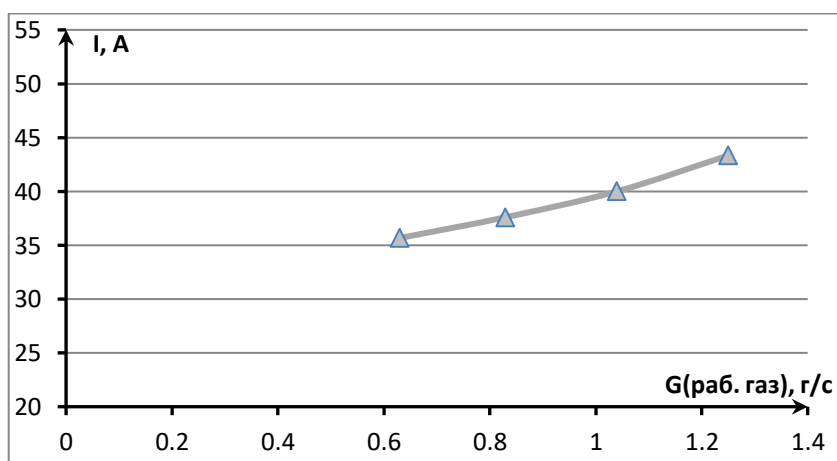


Рис.7 – График зависимости тока срыва дуги – I в А, от расхода рабочего газа $G_{\text{раб.газ}}, \Gamma/\text{с}$

Формула такого графика:

$$I \approx 7,5325G^2 - 1,894G + 33,902$$

Таблица 3. Зависимость средней напряженности поля от расхода рабочего газа, при фиксированном токе 48 А.

$G_{\text{раб.газ}}, \text{ г/с}$	$V, \text{ В}$	$E, \text{ В/см}$
0,63	164	36,08
0,83	180	39,6
1,04	190	41,8
1,25	200	44

6.4 Зависимость средней напряженности поля от расхода рабочего газа.

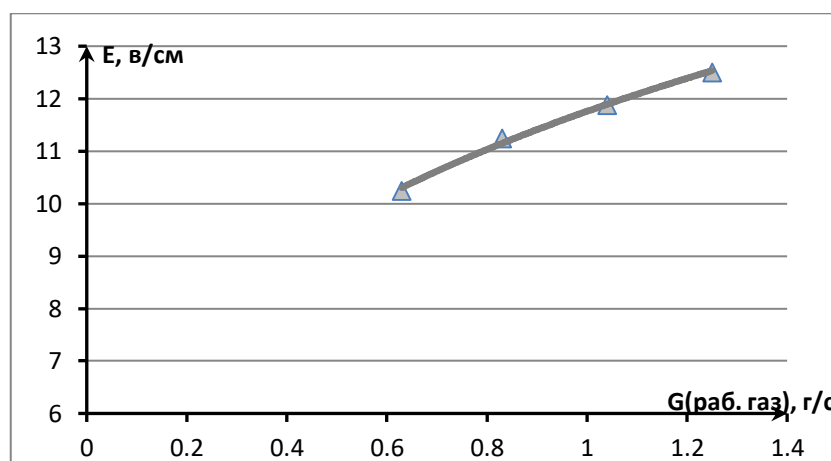


Рис.8. График зависимости средней напряженности поля E от расхода рабочего газа $G(\text{раб. газ})$, при токе 48 А.

Формула такого графика:

$$E \approx 11,76 * G^{0,29}$$

7. Погрешности:

7.1 Погрешность измерения напряжения:

$$\Delta V_1 = \varepsilon_{\text{кл.т}} k = 1,5\% * 150 = 2,25 \text{ В}$$

Δ где k

— максимальное значение напряжения, которое может измерить прибор

Тогда погрешность измерения напряжения будет равна

$$\Delta V = \sqrt{\left(\frac{dV}{dV_1}\right)^2 \Delta V_1^2} \approx 4,5 \text{ В}$$

7.2 Погрешность измерения тока:

$$V_2 = \varepsilon_{\text{кл.т.к}} = 0,05\% * 44,84 \approx 0,02 \text{ мВ,}$$

Тогда Погрешность измерения тока будет равна

$$\Delta I = \sqrt{\left(\frac{dI}{dV_2}\right)^2 \Delta V_2^2} = \frac{2}{R} \Delta V_2 = 6,7 * 0,02 = 0,13 \text{ А}$$

7.3 Погрешности ВАХ:

$$\Delta V = \sqrt{\left(\frac{dV}{dI}\right)^2 \Delta I^2}$$

$$\Delta V \approx 0,4 * 770 * I^{-1,4} * \Delta I - \text{для расхода } 0,63 + 0 \text{ г/с}$$

$$\Delta V \approx 0,35 * 701 * I^{-1,35} * \Delta I - \text{для расхода } 0,85 + 0,13 \text{ г/с}$$

$$\Delta V \approx 0,35 * 764 * I^{-1,35} * \Delta I - \text{для расхода } 1,04 + 0,13 \text{ г/с}$$

$$\Delta V \approx 0,28 * 589 * I^{-1,28} * \Delta I - \text{для расхода } 1,25 + 0,2 \text{ г/с}$$

$$\Delta V \approx 40 * I^{-1,4} - \text{для расхода } 0,63 + 0 \text{ г/с}$$

$$\Delta V \approx 32 * I^{-1,35} - \text{для расхода } 0,85 + 0,13 \text{ г/с}$$

$$\Delta V \approx 35 * I^{-1,35} - \text{для расхода } 1,04 + 0,13 \text{ г/с}$$

$$\Delta V \approx 21 * I^{-1,28} - \text{для расхода } 1,25 + 0,2 \text{ г/с}$$

7.4 Погрешность среднего значения поля

Для тока 48А будет равна:

$$\Delta E = \frac{\Delta V}{d} = \frac{4,5}{16} = 0,28$$

8. Выводы:

Исходя из графиков – рис.5, получается слабо падающая ВАХ. А это подтверждает теоретическую модель для плазмотронов с мэв.

Получены аппроксимации для ВАХ:

$$V \approx 770 * I^{-0,4} \pm 40 * I^{-1,4} - \text{для расхода } 0,63 + 0 \text{ г/с}$$

$$V \approx 701 * I^{-0,35} \pm 32 * I^{-1,35} - \text{для расхода } 0,85 + 0,13 \text{ г/с}$$

$$V \approx 764 * I^{-0,35} \pm 35 * I^{-1,35} - \text{для расхода } 1,04 + 0,13 \text{ г/с}$$

$$V \approx 589 * I^{-0,28} \pm 21 * I^{-1,28} - \text{для расхода } 1,25 + 0,2 \text{ г/с}$$

Исходя из этих данных, можно сделать вывод, что увеличивая суммарный расход газа, ВАХ становится более пологой, а погрешность увеличивается.

Также получены сопротивления:

$$R \approx 308 * I_0^{-1,4} - \text{для расхода } 0,63 + 0 \text{ г/с}$$

$$R \approx 245 * I_0^{-1,35} - \text{для расхода } 0,85 + 0,13 \text{ г/с}$$

$$R \approx 267 * I_0^{-1,35} - \text{для расхода } 1,04 + 0,13 \text{ г/с}$$

$$R \approx 165 * I_0^{-1,28} - \text{для расхода } 1,25 + 0,2 \text{ г/с}$$

Исходя из этих данных, можно сделать вывод, что увеличивая суммарный расход газа, сопротивление уменьшается.

Найдена зависимость тока срыва дуги:

$$I \approx 7,53G^2 - 1,89G + 33,9 \pm 0,13 \text{ А}$$

И зависимость средней напряженности поля:

$$E \approx 30,1 * G^{0,29} \pm 0,28 \text{ В/см}$$

Для тока 48А.

9. Список литературы:

1. L. Leblanc, C. Moreau. The long-term stability of plasma spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2002, Volume 11, Issue 3, pp. 380-386.
2. М.Ф. Жуков, И.М. Засыпкин, А.Н. Тимошевский, Б.И. Михайлов, Г.А. Десятков Электродуговые генераторы термической плазмы. Новосибирск: Наука. Сиб. Предпр. РАН, 1999. — 712 с
3. V.I. Kuzmin, A.A. Mikhailchenko, O.B. Kovalev, E.V. Kartaev, N.A. Rudenskaya Technique of formation of an axisymmetric Heterogeneous flow during thermal spraying of powder materials. *Journal of Thermal spray technology*, 2012, volume 21, number 1, p159-168.
4. Н.Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М: Наука, 1972. - 720 с.
5. А. С. Предводителев. Таблицы термодинамических функций воздуха. М: Изд-во АН СССР, 1957.-303 с.