АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КРАТЕРОВ В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

#### Гашков М.А.,

Зубарев Н.М., Месяц Г.А., Уйманов И.В.

Институт Электрофизики УрО РАН Лаборатория нелинейной динамики

20-я Конференция молодых ученых ИЭФ УрО РАН Екатеринбург 2018

### Микрократеры на катоде





Поверхность катода V.F.Pushkarev, A.M.Murzakaev. // J. Phys. D: Appl. Phys. 23. – 1990. – 23 26. – pp.26-35. "Корона" G.E.Cossalli, A.Cogne, M.Marengo. // Exp. In Fluids. – 1997. – 12. – pp.463 –472.

Согласно концепции, развиваемой Г.А. Месяцем, самоподдержание вакуумного дугового разряда происходит за счёт формирования микроструй, микрокапель при выдавливании жидкого металла из кратеров. Подобные микронеоднородности обеспечивают условия для взрывной электронной эмиссии.

## Цель работы:

Продолжение исследования [\*] механизмов образования жидкометаллических струй в катодном пятне вакуумного дугового разряда с использованием данных численного моделирования, проведённого для ряда диаметров кратера, а также токов, пропускаемых через ячейку.

<sup>\*</sup> Гашков М. А., Зубарев Н.М., Месяц Г.А., Уйманов И.В. Механизмы образования жидкометаллических струй в катодном пятне вакуумного дугового разряда //Письма в Журнал технической физики. – 2016. – Т. 42. – №. 16. – С. 48-55. 3

#### Результаты численного моделирования



- Моделирование образования единичного кратера происходит в рамках полуэмпирической методики, предложенной в [\*]
- На рисунке: расчёт образования кратера для медного катода с током ячейки 3.2 А

(пороговый ток 1.6 А)

При *t* ≈ 10 нс по контуру кратера образуется жидкометаллический вал

\* Месяц Г.А., Уйманов И. В. Двумерная модель образования элементарного кратера на катоде вакуумного разряда //Известия ВУЗов. Физика. – 2015. – Т. 58. – №. 9-2. – С. 204-208

## Результаты численного 2D моделирования

Ex	i <sub>c</sub> ,	r <sub>0</sub> ,	j <sub>0</sub> ·10 <sup>−8</sup> ,	$q_0 \cdot 10^{-12}$ ,	$p_0 \cdot 10^{-8}$ ,	t <sub>s</sub> ,	d <sub>jet</sub> ,	В [*] проведено моделирование
р	А	mm	A/cm <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	Pa	ns **	mm	формирования микрократеров для
1	1.6	0.4	3.18	4.69	6.36	4.8	0.11	диапазона токов и диаметров
2	1.6	0.45	2.52	3.70	5.04	5.3	0.13	кратеров вакуумной дуги. Для кажлого получены зависимости:
3	1.6	0.5	2.04	2.99	4.08	6.1	0.15	$R = R(t), r_0 = r_0(t), a = a(t).$
4	3.2	0.7	2.08	3.08	4.16	9.2	0.147	3,0E -06
5	3.2	0.8	1.59	2.33	3.18	10.5	0.178	2,0E-06
6	3.2	1.0	1.02	1.50	2.04	14.3	0.23	
7	5	0.9	1.97	2.88	3.94	10.8	0.16	E 1,0E-06
8	5	1.0	1.59	2.33	3.18	12.4	0.20	₹ 0,0E+00
9	5	1.2	1.11	1.62	2.22	16.7	0.28	-1,0E-06
10	7	1.0	2.23	3.27	4.46	11.5	0.2	-2, 0E -06
11	7	1.2	1.56	2.27	3.12	14.8	0.25	-3,0E-06
12	7	1.5	0.99	1.45	1.98	21.6	0.32	0,0E+00 1,0E-06 2,0E-06 3,0E-06 4,0E-06 5,0E-06 r,μm

\* Mesyats G. A., Uimanov I. V. Semiempirical Model of the Microcrater Formation in the Cathode Spot of a Vacuum Arc //IEEE Transactions on Plasma Science. – 2017. – T. 45. – №. 8. – P. 2087-92.

\*\* t<sub>s</sub> – время, за которое расплав вытесняется из микрократера и по краям образуется жидкометаллический вал.

### Механизмы развития неустойчивости

Неустойчивость Релея-Плато

$$\gamma_k^2 = \frac{\sigma}{\rho r_0^3} \frac{I_1(kr_0)}{I_0(kr_0)} \left( kr_0 - k^3 r_0^3 \right)$$

- Стремится минимизировать площадь свободной поверхности
- В классическом случае приводит к разбиению цилиндра на капли

#### Неустойчивость Релея-Тейлора

$$\gamma_k^2 = ak - \sigma k^3 / \rho$$

- Жидкость в кромке вала движется с отрицательным ускорением
- В классическом случае развивается при ускоренном движении границы раздела

Спектр возмущений вала дискретен:  $k_n(t) = \frac{n}{R(t)}$ 

$$\gamma_n^2 = \frac{\sigma}{\rho r_0^3} \frac{I_1(nr_0/R)}{I_0(nr_0/R)} \left[ \frac{nr_0}{R} - \left(\frac{nr_0}{R}\right)^3 \right]$$

$$\gamma_n^2 = \frac{an}{R} - \frac{\sigma n^3}{\rho R^3}$$

\*где  $\gamma_k$  – инкремент неустойчивости, k – волновое число,  $I_0$  и  $I_1$  – модифицированные функции Бесселя первого рода,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\rho$  – плотность жидкости



\* Гашков М.А., Зубарев Н.М., Зубарева О.В., Месяц Г.А., Уйманов И.В. Модель расплескивания жидкого металла в катодном пятне вакуумного дугового разряда //ЖЭТФ. – 2016. – Т. 149. – №. 4. – С. 896-908.

### Результаты расчётов

При анализе распада вала на капли использованы следующие ключевые параметры:

*t<sub>char</sub>* • <u>Характерное время развития неустойчивости</u> – время, за которое амплитуда возрастает в *е* раз

N<sub>max</sub> • Номер самой быстрорастущей моды

 $A_n^{rel}(N_{max})$  . Относительный рост амплитуды этой моды



#### Характерные времена развития неустойчивостей



# Характерные времена развития неустойчивости РП всего в 1-1.5 раза больше времён t<sub>s</sub>.

# Выводы

В данной работе был проведен анализ развития неустойчивостей Релея-Тейлора (РТ) и Релея-Плато (РП) торообразного жидкометаллического вала при вытеснении расплава из микрократеров на катоде давлением катодной плазмы. Были получены следующие результаты:

- В широком диапазоне токов и размеров кратеров ответственна неустойчивость РП
- Номер доминирующей моды неустойчивости РП с увеличением тока растёт
- Относительный рост амплитуды неустойчивости РП растёт с увеличением тока
- Отношение характерного времени развития неустойчивости РП и времени вытеснения заметно не отличаются для диапазона токов
- Влияние неустойчивости РТ с увеличением тока на распад вала становится незначительным

# Благодарю за внимание



#### Образец слайда

Образец надписи