

Динамика расплавленного металла катодного пятна вакуумной дуги

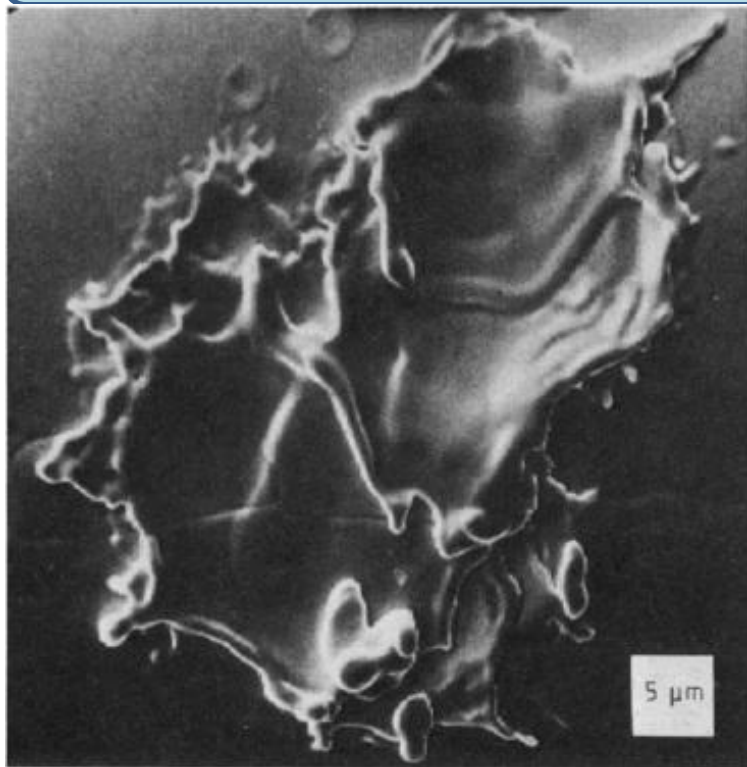
Гашков М.А., Зубарев Н.М.

Институт Электрофизики УрО РАН
Лаборатория нелинейной динамики
*E-mail: gashkov@ier.uran.ru



17-я Конференция молодых ученых ИЭФ УрО РАН
Екатеринбург 2015

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.

План работы:

1. Анализ динамики жидкого металла на основе принципа гидродинамического подобия.
2. Построение качественной модели поведения расплавленного металла в катодном пятне вакуумной дуги.

Принцип гидродинамического подобия

Если подобие имеет место для двух систем, то, зная картину течения для первой системы, можно однозначно предсказать течение жидкости и для другой, геометрически подобной, системы.

$$We = \frac{\rho U^2 D}{\sigma}, \quad Re = \frac{UD}{\nu}$$

- Процессы, проходящие в катодном пятне вакуумной дуги, имеют пространственно-временной масштаб порядка микрометров и наносекунд (25-50 нс).
- Процессы, изучаемые в работах по падению капли на поверхность, имеют масштабы порядка миллиметров и миллисекунд. По ним имеются обширные экспериментальные данные.
- Оказывается, числа We , Re для этих процессов лежат в одинаковых диапазонах. Тогда, в соответствии с принципом гидродинамического подобия, можно сопоставлять эти процессы.

Критерии расплёскивания из различных работ

$$We^{\alpha} \cdot Re^{\beta} \geq K_s$$

№	Работа	α	β	K_s
1	Cossalli, 1997	0.8	0.4	2100
2	Bai, 2002	0.817	0.366	1320
3	Huang, 2008	0.25	0.25	25
4	Wal, 2006	0.5	0.17	63
5	Wang, 2000	1	0	407
6	Rioboo, 2003	1	0	480

Оценка параметров для жидкого металла

Согласно представлениям,
развиваемым И.Г.Кесаевым, а
впоследствии и Г.А.Месяцем, катодное
пятно имеет ячеистую структуру.

По оценкам:
 $I_c = 1.6 A;$
 $D_0 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$

$$u_i = 1.28 \cdot 10^4 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad \gamma_i = 3.9 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Кэ}}{\text{К}} \quad \rho = 8 \cdot 10^3 \frac{\text{Кэ}}{\text{м}^3}, \quad \sigma = 1.37 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \quad \nu = 4.16 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

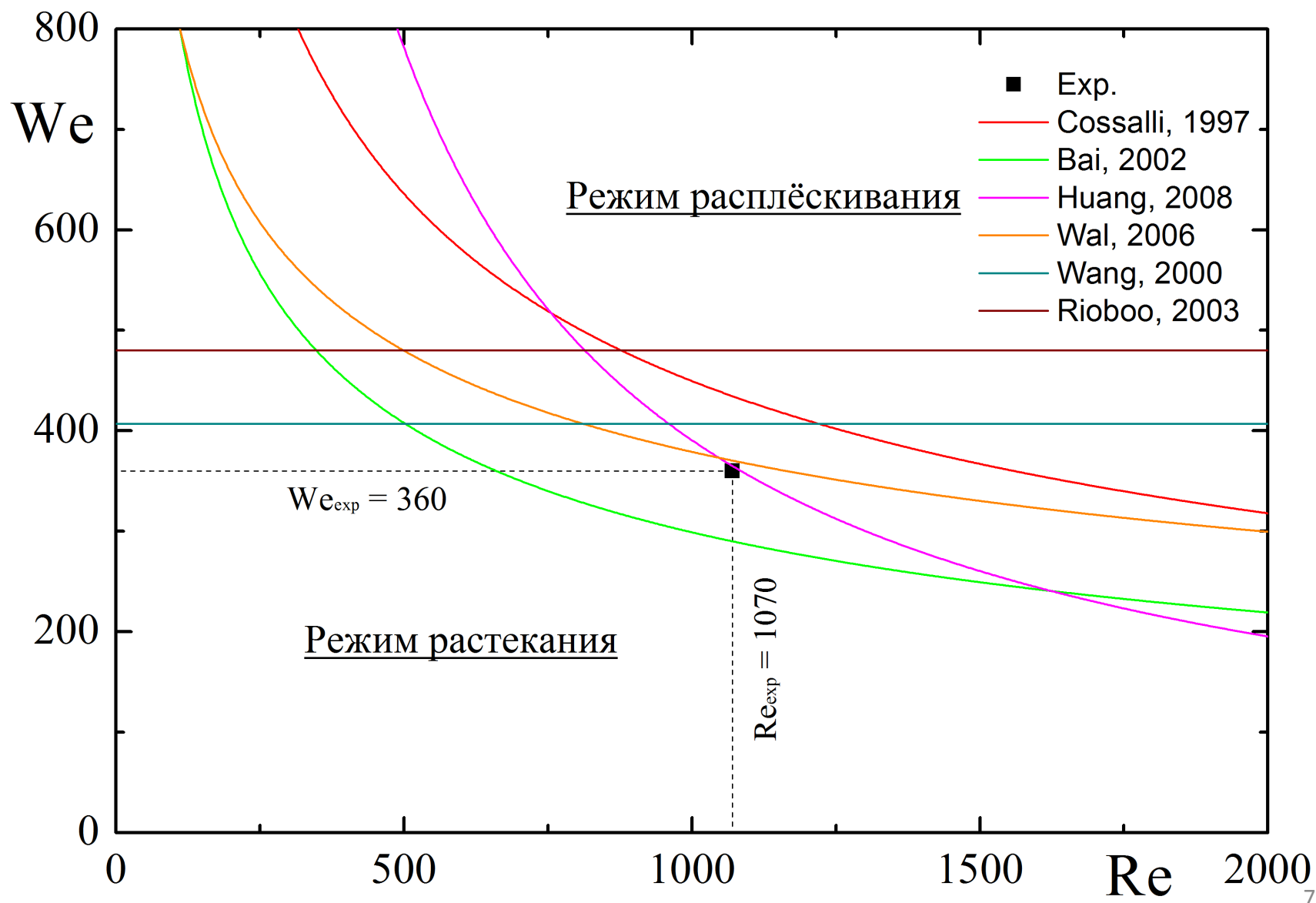
$$P = \frac{4I_c u_i \gamma_i}{\pi D_0^2}, \quad U = \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \quad P \approx 6.4 \cdot 10^7 \text{ Па}, \quad U \approx 126 \text{ м/с}$$

$$\text{We}_{\text{exp}} = 360, \quad \text{Re}_{\text{exp}} = 1070$$

В экспериментах по гидродинамике
величины изменяются в следующем
диапазоне (Cossalli, 1997):

$$200 \leq \text{We} \leq 1600;$$
$$100 \leq \text{Re} \leq 18000.$$

Сравнение с работами по расплёскиванию

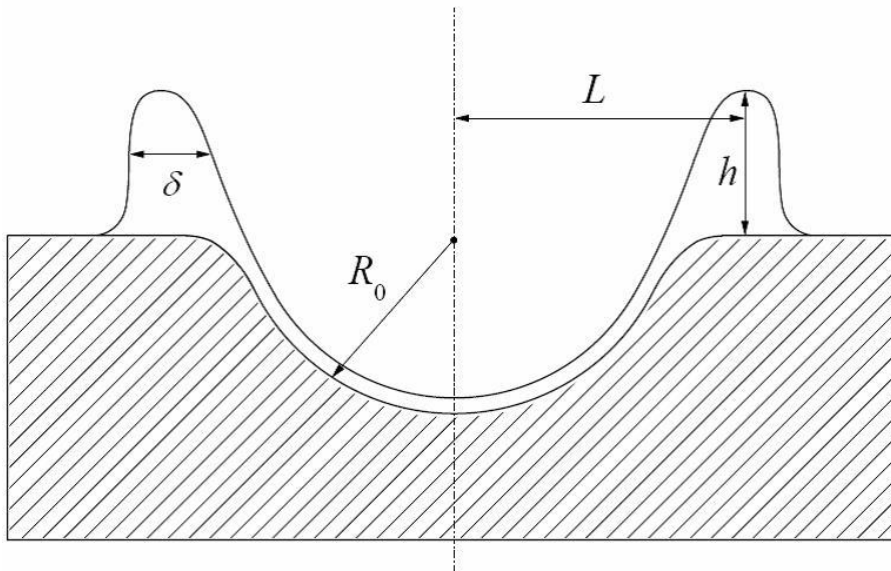


Качественная модель расплёскивания жидкого металла

Использовавшиеся
предположения:

1) Внешнее давление постоянно и действует только над кратером. Движение жидкости вне кратера инерциально.

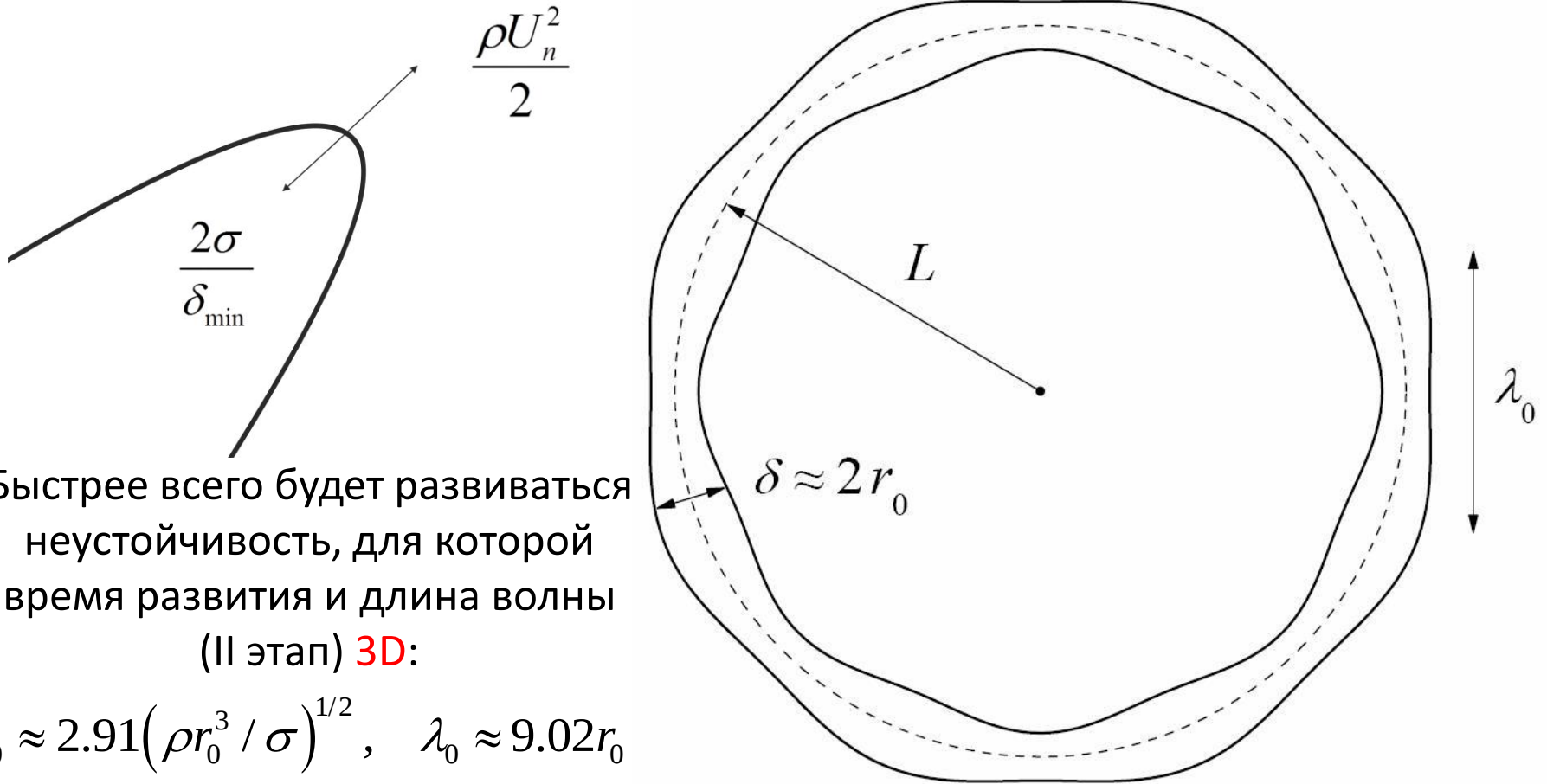
2) $\frac{h}{L} = \operatorname{tg} 25^\circ$, что согласуется с экспериментальными данными по угловому распределению формирующихся микрокапель.



3) Процесс происходит в 2 этапа:

- i. Формирование жидкометаллического вала за счёт вытеснения жидкого металла из кратера давлением плазменного факела .
- ii. Распад вала на струи и капли за счёт развития неустойчивости Рэлея-Плато. При этом нарушается осевая симметрия задачи (**задача становится трёхмерной**).

Неустойчивость Рэля-Плато



Быстрее всего будет развиваться неустойчивость, для которой время развития и длина волны (II этап) **3D**:

$$t_0 \approx 2.91 \left(\rho r_0^3 / \sigma \right)^{1/2}, \quad \lambda_0 \approx 9.02 r_0$$

Критерий применимости, из которого полагается условие расплёскивания, является то, что к концу II этапа должно выполняться:

$$\frac{\rho U_n^2}{2} \geq \frac{2\sigma}{\delta_{\min}}$$

Результаты модели

Условие формирования струй:

$$We \geq We_c = 394$$

$$We_{\text{exp}} = 371$$

$$T_0 = 3^{-1/2} R_0 \sqrt{\frac{\rho}{P_0}} \cdot \left(1 + \frac{2^{13/8} s_1^{1/4} \left(\frac{2^7 s_1^{2/3}}{3^{8/3} (\text{tg } 25^\circ)^{7/3}} \right)^{1/8}}{3 \cdot (\text{tg } 25^\circ)^{3/8}} \right)$$

$$R_0 = 2 \text{ мкм} \quad \Rightarrow \quad U_{\text{max}} \approx 145 \text{ м/с}, \quad T_0 \approx 56 \text{ нс}$$

$$R_0 = 1.5 \text{ мкм} \quad \Rightarrow \quad U_{\text{max}} \approx 168 \text{ м/с}, \quad T_0 \approx 37 \text{ нс}$$

Пороговый ток лежит в
интервале ($R_0 = 2 \text{ мкм}$):

$$1.42 \text{ А} \leq I_{\text{min}} \leq 2.85 \text{ А}$$

Выводы

1. Показано, что числа Вебера и Рейнольдса, характеризующие процесс вытеснения жидкого металла из формирующихся на катоде кратеров, лежат вблизи границы режимов растекания и расплёскивания. Это свидетельствует о ключевой роли гидродинамических процессов для самоподдержания вакуумной дуги.
2. Построена качественная модель расплёскивания жидкого металла в катодном пятне вакуумной дуги, учитывающая трёхмерные эффекты. Оценки, полученные из модели, качественно совпадают с экспериментальными данными.

Благодарю за внимание

