

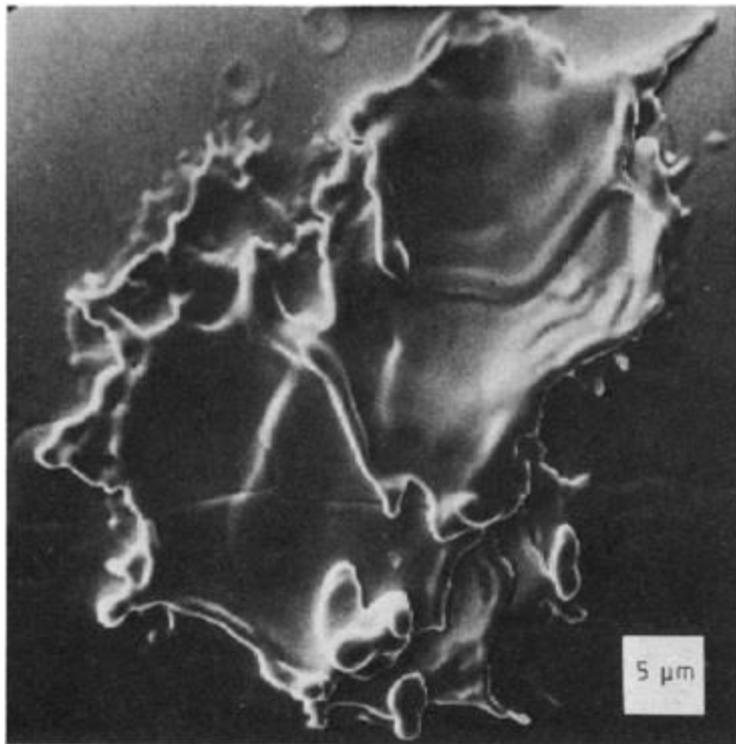
КРИТЕРИИ РАСПЛЁСКИВАНИЯ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

Гашков М.А., Зубарев Н.М.

Институт Электрофизики УрО РАН
Лаборатория нелинейной динамики

19-я Конференция молодых ученых ИЭФ УрО РАН
Екатеринбург 2017

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:

- Проанализировать динамику жидкого металла для различных материалов катода
- На основе принципа гидродинамического подобия сопоставить данные с результатами работ по падению капли на поверхность
- Предложить новый критерий всплеска жидкости на основе анализа работы по изучению периодического падения капли на поверхность

Принцип гидродинамического подобия

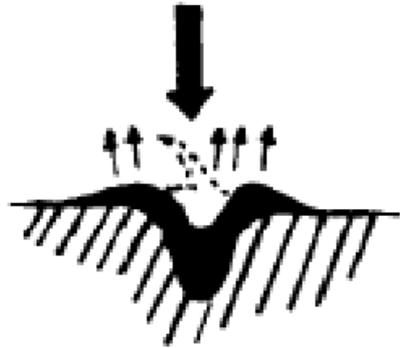
Если подобие имеет место для двух систем, то, зная картину течения для первой системы, можно однозначно предсказать течение жидкости и для другой, геометрически подобной, системы.

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

- 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.

Оценка скорости движения жидкого металла

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



Импульс, передаваемый жидкому металлу плазмой за время дугового цикла.

$$p \approx s I u_i \gamma_i T$$

$$s = ?$$

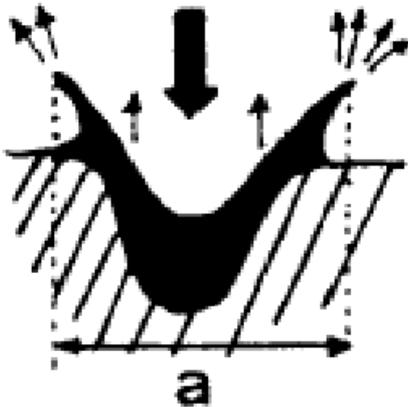
Разлёт плазмы нормален к поверхности

$$s = 1$$

Разлёт плазмы изотропен

$$s = 1/2$$

$$s = 3/4$$



Характерная скорость жидкого металла

$$U = \frac{12p}{\pi \rho D_0^3}$$

B. Juttner // Erosion craters and arc cathode spots in vacuum, 1978.

Оценки для катодов различных металлов

**

Metal	We	Re	$u_i, 10^4$ m/s	$\gamma_i, 10^{-6}$ g/C	$\rho,$ g/cm ³	$I_c,$ A	$\sigma,$ N/m	$\eta, 10^{-3}$ Pa·s	$U,$ m/s	$D,$ μm
Cu	399	858	1.28	40	8	1.6	1.37	4.34	147	4
W	179	789	1.05	62	17	1.6	2.32	6	88	4
Au	319	828	0.58	121	17.4	1.4	1.13	5.38	81	4
Mo	431	996	1.74	47	10.2	1.5	2.23	5.6	172	4

*¹ Месяц Г. А. Эктон—лавина электронов из металла //Успехи физических наук. – 1995. – Т. 165. – №. 6. – С. 601-626.

*² Iida T., Guthrie R. I. L. The physical properties of liquid metals //Clarendon Press, Walton Street, Oxford OX 2 6 DP, UK, 1988. – 1988.

*³ Daalder J. E. Diameter and current density of single and multiple cathode discharges in vacuum //IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1974. – №. 6. – С. 1747-1757.

Критерии расплёскивания из различных работ

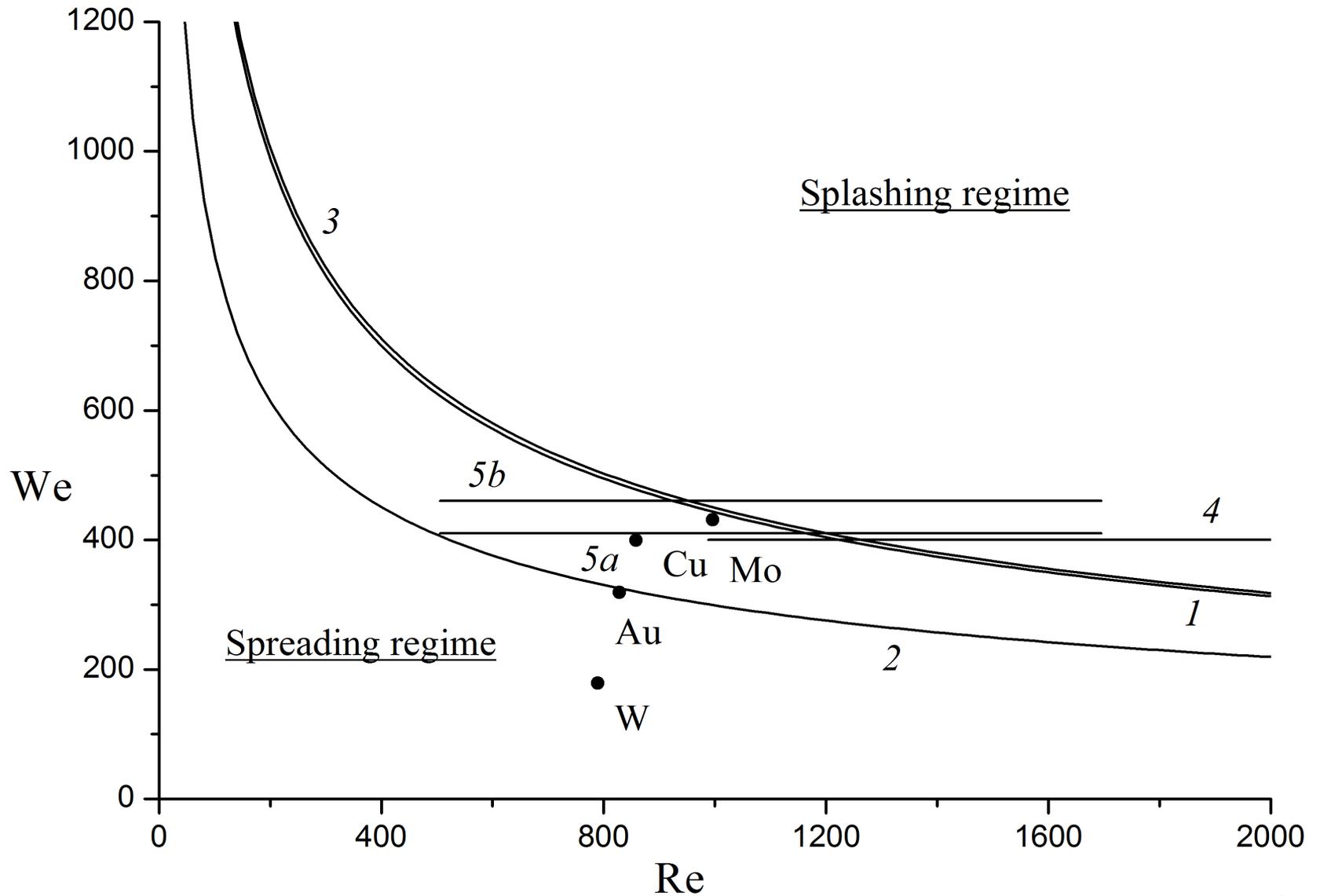
$$We^\alpha Re^\beta \geq K_s$$

Ref.	α	β	K_s	We_{\min}	We_{\max}	Re_{\min}	Re_{\max}
1	0.8	0.4	2074	–	–	–	–
2	0.817	0.366	1320	–	–	–	–
3	0.8	0.4	2100	28	890	96	2600
4	0.5	0	20	127	1420	988	14000
5a	1	0	410	377	2010	505	1695
5b	1	0	460	377	2010	505	1695

**

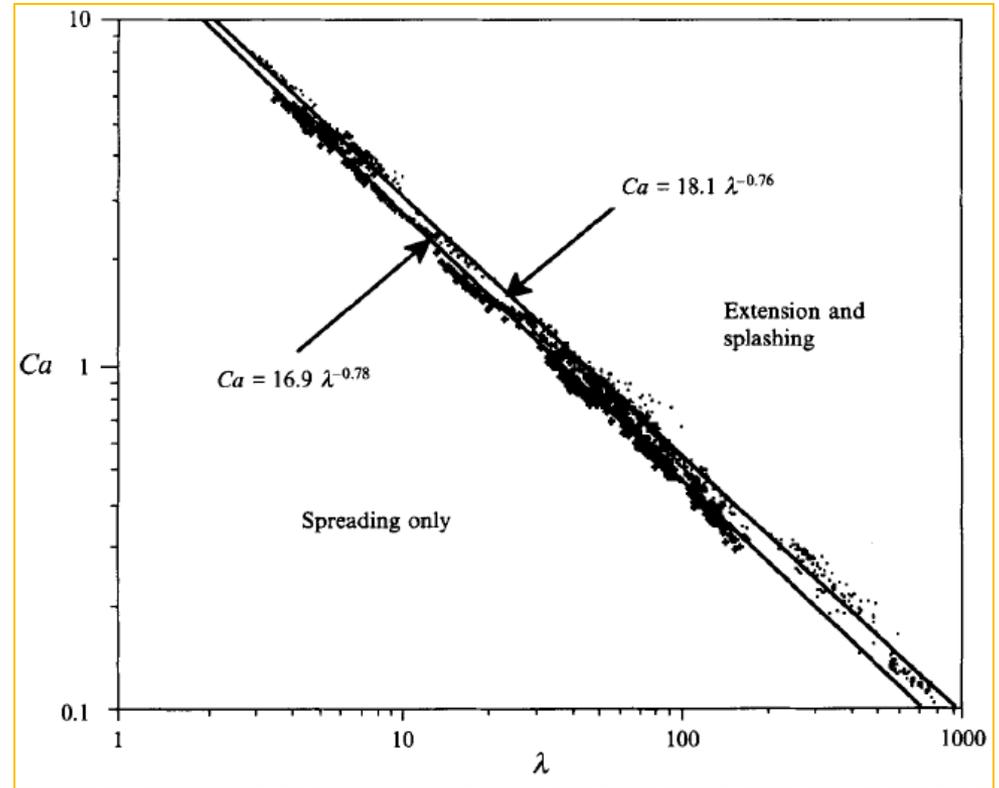
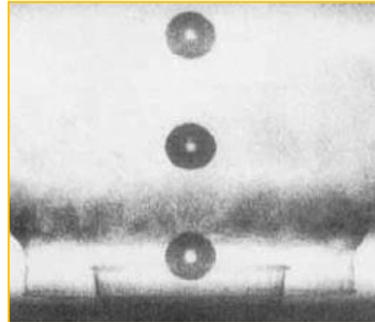
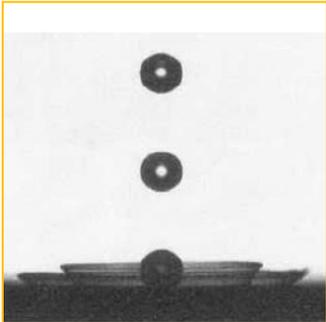
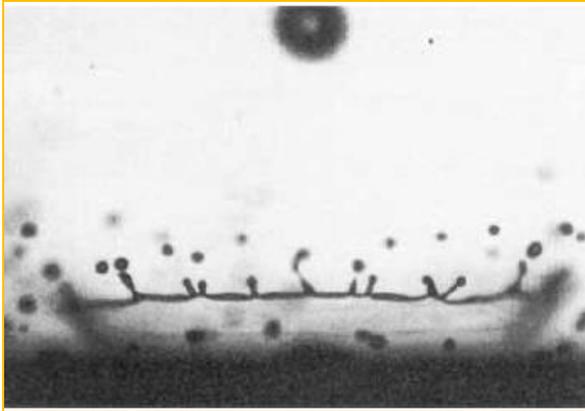
**Результаты направлены для публикации в IOP Conference Series*

Сравнение с работами по расплёскиванию



Периодическое падение капель

Периодическое падение капель на поверхность исследовалось в [*].



Введённую в [*] частоту падения капель f применительно к динамике металла в катодном пятне можно отождествить с временем дугового цикла T

* Yarin, A. L., and D. A. Weiss. "Impact of drops on solid surfaces: self-similar capillary waves, and splashing as a new type of kinematic discontinuity." *Journal of Fluid Mechanics* 283 (1995): 141-173

Периодическое падение каплеь

В [*] введены
капиллярное число
и безразмерная
длина вязкости

$$Ca = \rho U v \sigma^{-1}$$

$$\lambda_v = \sigma f^{-1/2} \nu^{-3/2} \rho^{-1}$$

Исследованные в [*]

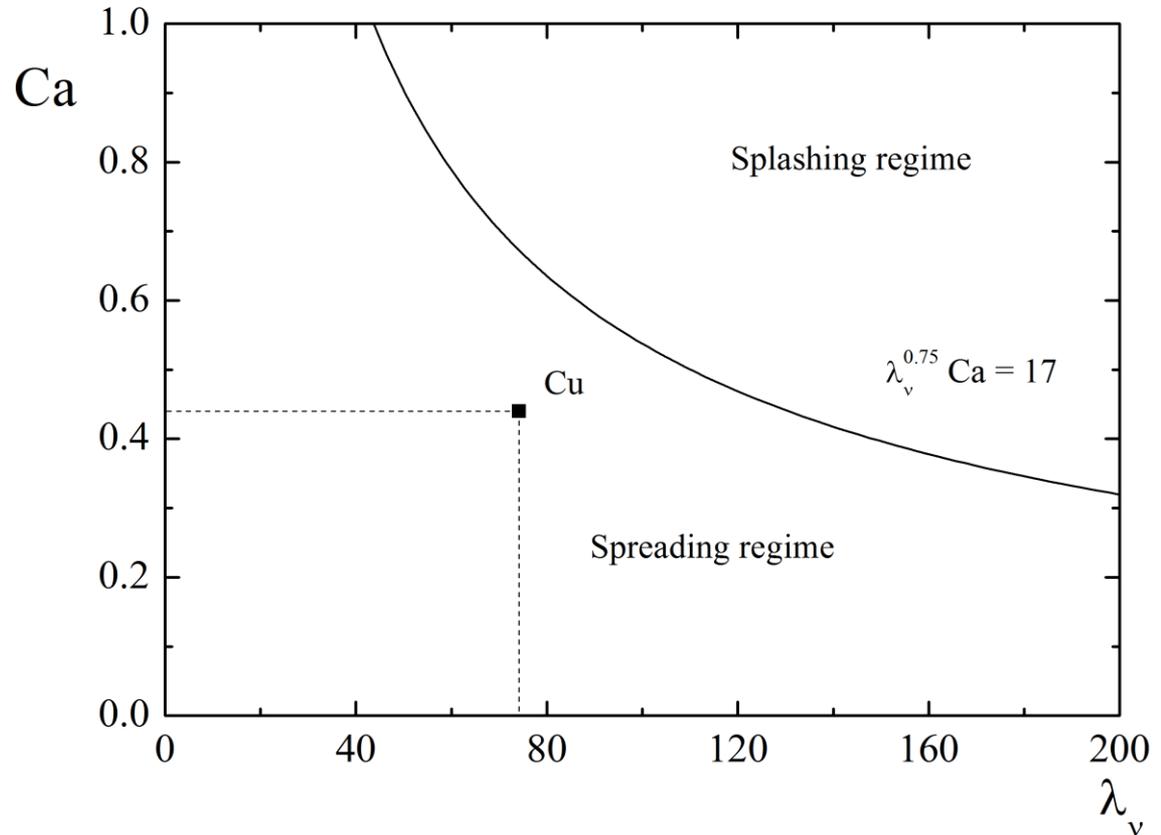
диапазоны:

$$0.1 \leq Ca \leq 8$$

$$3 \leq \lambda \leq 1000$$

Оценка для Cu:

$$Ca \approx 0.44, \lambda_v \approx 74.2$$



Критерий расплёскивания через групповую скорость

T Время цикла

D Пространственный масштаб

U Скорость вдавливания
границы вглубь жидкости

Процесс распространения энергии и импульса определяется

групповой скоростью

Дисперсионное соотношение для капиллярных волн на тонком слое

$$U_g(k) \equiv \frac{\partial \omega}{\partial k}$$

$$\omega^2 = (\sigma h / \rho) k^4$$

Жидкость будет расплёскиваться при значительном превышении **скоростью вытеснения** жидкого металла из кратера **групповой скорости**

$$U \geq U_s = cU_g$$

Вязкость учитывается не напрямую, а косвенно, через глубину слоя жидкости

$$h \approx (\nu T / \rho)^{1/2}$$

$$U \geq U_s, \quad U_s = 4\pi c \cdot \text{We}^{-\frac{1}{2}} \text{Re}^{-\frac{1}{4}} U$$



$$\text{We}^{\frac{1}{2}} \text{Re}^{\frac{1}{4}} = C^2 = 4\pi c$$

Из работы [*] возьмём постоянную $C \approx 17...18$.

Приложение к динамике металла в катодном пятне

Подставим оценённое значение для скорости жидкого металла на медном катоде $U = 147 \text{ m/s}$ в **полученный критерий** и найдём, что пороговая скорость $U_s \approx 390 \text{ m/s}$.

Причина в том, что использованное значение $C = 17$ найдено для **идеальных условий**: капли падали с контролируемой частотой на идеальную гладкую поверхность. В условиях **вакуумного дугового разряда** следует ожидать уменьшения порогового значения из-за наличия шероховатостей.

Равенство скоростей достигается при достижении значения

$$C \approx 10 (c \approx 8.6).$$

Выводы

- Проанализирована динамика жидкого металла для различных материалов катода
- На основе принципа гидродинамического подобия сопоставлены данные с результатами работ по падению капли на поверхность
- Предложен новый критерий всплеска жидкости на основе анализа работы по изучению периодического падения капли на поверхность

Использованная литература по ссылкам

- [1] Huang Q and Zhang H 2008 *Pet. Sci.* 5 62–6
- [2] Bai C X, Rusche H and Gosman A D 2002 *Atomization Sprays* 12 1–15
- [3] Rioboo R, Bauthier C, Conti J, Voue M and De Coninck J 2003 *Exp. Fluids* 35 648–52
- [4] Vander Wal R L, Berger G M and Mozes S D 2006 *Exp. Fluids* 40 53–9
- [5] Wang A B and Chen C C 2000 *Phys. Fluids* 12 2155–58

Благодарю за внимание

