Гашков Михаил Алексеевич

ДИНАМИКА РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА

01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

Научный руководитель: член-корр. РАН, д. ф.-м. н. Зубарев Н.М.

Екатеринбург 2018

Актуальность темы исследования

- Основные *свойства* вакуумного дугового разряда определяются процессами в катодном пятне.
- Согласно [*1], катодное пятно вакуумной дуги состоит из отдельных фрагментов ячеек.
- Согласно концепции, развиваемой Г.А. Месяцем [*2], ключевую роль *в самоподдержании* вакуумной дуги играет *взрывная электронная эмиссия* с микронеоднородностей, которые воспроизводятся за счёт образования в катодном пятне *струй* жидкого металла.
- В [*3] предложен подход к рассмотрению *гидродинамических процессов* в ячейках катодного пятна, основанный на *аналогии* с процессами, происходящими при *столкновении капель жидкости* с твердой поверхностью.

Поверхность катода

Puchkarev, V. F., & Murzakayev, A. M. (1990). Current density and the cathode spot lifetime in a vacuum arc at threshold currents. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 23(1), 26.

"Kopoнa" (crownsplash) Cossali, G. E., Coghe, A., & Marengo, M. (1997). The impact of a single drop on a wetted solid surface. Experiments in fluids, 22(6), 463-472.





- Развитие этого подхода позволяет достичь заметного прогресса в понимании динамики жидкой фазы в катодном пятне вакуумной дуги.
- Актуальность проведенных исследований обусловлена необходимостью понимания *механизмов самоподдержания* вакуумного дугового разряда, а также *механизмов эрозии* катода.
 - [*1] Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. Наука, 1968.
 - [*2] Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М. : Наука, 2000.

[*3] Mesyats, G. A., & Zubarev, N. M. (2013). Hydrodynamics of the molten metal in a vacuum arc cathode spot at near-threshold currents. *Journal of Applied Physics*, 113(20), 203301.

Целью работы является описание гидродинамических процессов в жидкой фазе единичной ячейки катодного пятна вакуумной дуги,

в частности:

- Показать, что параметры движения расплавленного металла в катодном пятне *при околопороговых токах* соответствуют критическим условиям *образования струй* при столкновении одиночных капель с поверхностью.
- Сопоставить *циклические гидродинамические процессы* в катодных пятнах вакуумного дугового разряда с процессами, происходящими при *периодическом столкновении капель* с поверхностью.
- Выявить *механизм образования жидкометаллических струй* при выдавливании давлением взрывной плазмы расплава из формирующихся кратеров в катодном пятне вакуумной дуги.
- Сформулировать критерий формирования жидкометаллических струй.
- Оценить основные пространственные и временные *характеристики процесса вытеснения* жидкого металла из формирующихся кратеров с его последующим расплескиванием.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 23 печатных работ, из них 6 – в рецензируемых научных журналах и 17 – в сборниках трудов конференций.

Публикации в реферируемых научных журналах:

- 1. М.А. Гашков, Н.М. Зубарев, О.В. Зубарева, Г.А. Месяц, И.В. Уйманов. «Модель расплескивания жидкого металла в катодном пятне вакуумного дугового разряда». ЖЭТФ, том 149, вып. 4, стр. 896-908, 2016.
- 2. М.А. Гашков, Н.М. Зубарев, Г.А. Месяц, И.В. Уйманов. «Механизмы образования жидкометаллических струй в катодном пятне вакуумного дугового разряда». Письма в ЖТФ, том 42, вып. 16, стр. 48-55, 2016.
- 3. Gashkov M.A., Zubarev N.M., Mesyats G.A., Uimanov I.V. «Development of azimuthal instabilities of the liquid metal free surface during the formation of craters in a vacuum arc cathode spot». Известия ВУЗов: Физика, том 59, №9/2, стр. 53-58, 2016.
- 4. Formation of liquid-metal jets in a vacuum arc cathode spot: Analogy with drop impact on a solid surface / M. A. Gashkov, N. M. Zubarev // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 946. P. 012131.
- Splashing conditions for a liquid metal in vacuum arcs: Cyclic processes in a cathode spot / M. A. Gashkov, G. A. Mesyats, N. M. Zubarev // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Принято к публикации.
- Dynamics of Molten Metal Jet Formation in the Cathode Spot of Vacuum Arc Discharge / M. A. Gashkov, G. A. Mesyats, I. V. Uimanov, N. M. Zubarev // Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), 2018 28th International Symposium on / IEEE. Принято к публикации. 4

Апробация результатов работы

Основные результаты докладывались на следующих научных мероприятиях:

- 1. XV, XVI, XVII Всероссийские школы-семинары по проблема физики конденсированного состояния вещества. г. Екатеринбург, Россия. 2014 2016 г.
- 2. XVII, XVIII, XIX, XX Конференции молодых ученых ИЭФ УрО РАН. г. Екатеринбург, Россия. 2015 2018 гг.
- 3. ХХІІІ Научная сессия Совета РАН по нелинейной динамике. г. Москва, Россия. 2014 г.
- 4. XI Международная научная конференция "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики". г. Петергоф, Россия. 2015 г.
- 5. XI Международная научная конференция "Волновая электрогидродинамика проводящей жидкости". г. Ярославль, Россия. 2015 г.
- 6. XIX International Symposium on High Current Electronics. г. Томск, Россия. 2016 г.
- 7. XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. п. Эльбрус, Россия. 2017 г.
- 8. ХХ Зимняя школа по механике сплошных сред. г. Пермь, Россия. 2017 г.
- 9. XXIII Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых. г. Екатеринбург, Россия. 2017 г.
- 10. XXXIII International Conference on Phenomena in Ionized Gases. п. Эшторил, Португалия. 2017 г.
- 11. XIII Международная конференция "Газоразрядная плазма и ее применение". г. Новосибирск, Россия. 2017 г.
- 12. XXXIII International Conference on Equations of State for Matter. п. Эльбрус, Россия. 2018 г.
- 13. XX International Symposium on High Current Electronics. г. Томск, Россия. 2018 г.
- 14. XXVIII International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.г. Грайфсвальд, Германия. 2018 г.5

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.

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

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

Критерии расплёскивания из гидродинамических работ



Общий вид критерия смены режимов:

$$K = We^{\alpha} Re^{\beta} \ge K_s$$

α, *β*, *K*_s определяются экспериментально.

Work	Ref.	α	β	K _s	We _{min}	We _{max}	Re _{min}	Re _{max}
Huang Q, 2008	1	0.8	0.4	2074		—	—	—
Bai C X, 2002	2	0.817	0.366	1320	_			_
Rioboo R, 2003	3	0.8	0.4	2100	28	890	96	2600
Vander Wal R L, 2006	4	0.5	0	20	127	1420	988	14000
Wang A B, 2000	5a	1	0	410	377	2010	505	1695
Wang A B, 2000	5b	1	0	460	377	2010	505	1695

Оценки для катодов различных металлов

Metal	We	Re	u _i , 10 ⁴ m/s	γ _i , 10 ⁻⁶ g/C	ρ, 10 ³ kg/cm ³	<i>I</i> _c , А	σ, N/m	η, 10 ⁻³ Pa · s	<i>U,</i> * m/s	
Cu	399	858	1.28	40	8	1.6	1.37	4.34	147	N. 177-
W	179	789	1.05	62	17	1.6	2.32	6	88	TA
Au	319	828	0.58	121	17.4	1.4	1.13	5.38	81	a
Мо	431	996	1.74	47	10.2	1.5	2.23	5.6	172	B. Juttner // Erosion craters
$30 < We < 900$ ** * $12 sIu \gamma T$						<i>s</i> = 0.8		and arc cathode		
100 < Re < 2600				$U = \frac{1251 u_i \gamma_i T}{\pi \rho D_0^3}$				$D_0 = 0.4 \mu\text{m}$ $T = 30 \text{ns}$		spots in vacuum, 1978.

** Исследованный диапазон в [Rioboo R, 2003].

Здесь u_i – характерная скорость ионов, γ_i – ионная эрозия, ρ – плотность жидкости, I_c – пороговый ток, σ – коэффициент поверхностного натяжения, η – коэффициент вязкости, σ – диаметр ячейки. Данные из работ:

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. – C. 1747-1757.

8

Сравнение с работами по расплёскиванию



С использованием принципа гидродинамического подобия сопоставлено поведение расплавленного металла в катодном пятне вакуумной дуги с поведением жидкости при столкновении одиночных капель с плоской твердой поверхностью (для последнего имеются обширные данные об условиях расплескивания). Для различных материалов катода (Си, W, Au, Mo) продемонстрировано, что условия, реализующиеся при околопороговых токах, соответствуют пороговым условиям образования струй.

Периодическое падение капель

- Для учёта *цикличности* процессов, происходящих в вакуумном дуговом разряде, они были сопоставлены с работами по последовательному столкновению капель жидкости.
- Периодическое падение капель на поверхность исследовалось в [*].
- Введённую в [*] *частоту падения капель f* применительно к динамике металла в катодном пятне можно связать со *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 капель



* 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

Обоснована возможность использования метода гидродинамического подобия для сопоставления процессов, происходящих в жидкой фазе катодного пятна с учетом цикличности функционирования дуги, и процессов расплескивания жидкости при последовательном столкновении капель с поверхностью: несмотря на значительную разницу в пространственно-временных масштабах (соответственно, микрометры и наносекунды для дугового разряда и миллиметры и миллисекунды для падения капель), безразмерные гидродинамические числа, характеризующие эти процессы, практически совпадают.

Критерий расплёскивания через групповую скорость

T	Время цикла Простроистроиций моснитоб	Процесс распространения энергии и импульса определяется групповой скоростью $U(k) = \frac{\partial a}{\partial k}$				
D U	Гространственный масштао Скорость вдавливания границы вглубь жидкости	Дисперсионное соотношение для $\omega^2 = (\sigma h / \rho)k^4$ капиллярных волн на тонком слое				
Ж	идкость будет расплёски	иваться при значительном				

превышении скоростью вытеснения *U* жидкого металла из кратера групповой скорости *U*_g

 $U \ge U_c = aU_g$

Выражение для критической скорости U_c примет вид:

Заметим, что при записи в терминах чисел Ca и λ_v это выражение примет вид:

 $U_c = \sqrt{4\pi a} \frac{\sigma^{1/4} v^{1/8}}{\rho^{1/4} T^{3/8}}$

 $Ca \geq \tilde{C}\lambda_{\nu}^{-3/4}, \quad \tilde{C} = \sqrt{4\pi a}$

Из работы [*] возьмём постоянную $\tilde{C} = C \approx 17 \dots 18$. $\Rightarrow a = 23 \dots 26$.

* 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

Анализ критерия расплескивания

- Динамику расплескивания жидкости при периодическом падении капель на преграду будут определять два временных масштаба: 1/*f* и D/U.
- Переход к рассмотрению отдельной капли можно осуществить, полагая, что эти временные масштабы сопоставимы



Тогда критерий можно переписать в терминах чисел We и Re.

$$U \ge U_c, \quad U_c = 4\pi a \cdot We^{-\frac{1}{2}} Re^{-\frac{1}{4}} U$$
 We ^{$\frac{1}{2} Re $\frac{1}{4} = C^2$$}

Видно, что критерий имеет вид, подобный полученному в работах по столкновению отдельных капель с твердой поверхностью. Таким образом, с поправкой на качественный характер рассмотрения, различные подходы приводят к совпадающим результатам. Предложен критерий формирования жидкометаллических струй в катодном пятне вакуумной дуги, основанный на сравнении скорости выплескивания расплава из формирующихся кратеров и групповой скорости волн на поверхности жидкости.

Аналитическая модель расплёскивания расплава



Использовавшиеся предположения:

1) Внешнее давление *P*₀ постоянно и действует только над кратером. Движение жидкости вне кратера инерциально.

2) Истекающая из кратера под углом *α* жидкость образует тонкий конический слой, заканчивающийся тороидальным утолщением радиусом *r*.

3) Процесс происходит в 2 этапа:

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

Характеристики расплескивания расплава

Управляющие параметры модели:

- *P*₀ давление плазмы
- *R*₀ радиус кратера

 $I = \frac{\kappa \sigma \operatorname{We} R_0}{u_i \gamma_i}$ $T_0 = R_0 \sqrt{\frac{2\kappa \rho}{\pi P_0}} \left[1 - \frac{1}{2\cos\alpha} + 7 \left(\frac{\kappa^3 s_1^4}{3^3 2^{18} \pi^6 \cos^3 \alpha} \right)^{1/7} \operatorname{We}^{2/7} \right]$

Основные параметры ячейки катодного пятна:

- силу тока *I*
- время функционирования *T*₀
- расстояние, на которое расплескивается жидкий металл, $L(T_0)$
- скорость расплава U_{\max}

*We =
$$\frac{\rho U_{\text{max}}^2 R_0}{\sigma}$$

$$L(T_0) = 7 \left(\frac{\kappa^3 s_1^4 \cos^4 \alpha}{3^3 2^{11} \pi^6} \right)^{1/7} \text{We}^{2/7} R_0$$
$$U_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2\pi P_0}{2\pi P_0}}$$

Обозначения: • ρ – плотность расплава • σ – поверхностное натяжение расплава • u_i – скорость ионов • γ_i – ионная эрозия • $\kappa = \kappa(\alpha)$ характеризует геометрию • $s_1 \approx 2.91$ • $s_2 \approx 9.02$ • We – число Вебера*

Определение порога расплёскивания

- Инерциальное движение жидкости будет тормозиться капиллярными силами.
- Наличие этих сил связано с ростом площади поверхности вала и, следовательно, увеличением поверхностной энергии.
- Условие, при котором капиллярные силы не остановят рост вала, можно получить, сравнивая *кинетическую и потенциальную энергии* системы. При этом будем считать, что механическая энергия системы сохраняется.

При
$$\alpha = 30^{\circ *} \operatorname{We}_{c} \approx 497$$

^{*} Daalder, J. E. (1976). Components of cathode erosion in vacuum arcs. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 9(16), 2379.

$$P_c \approx 34.1 \frac{\sigma}{R_0}$$
$$U_{\max,c} \approx 22.3 \left(\frac{\sigma}{\rho R_0}\right)^{1/2}$$
$$T_0 \approx 2.64 R_0 \sqrt{\frac{2\kappa\rho}{\pi P_0}}$$
$$L(T_0) \approx 3.84 R_0$$
$$I_{\min} \approx 214 \frac{\sigma R_0}{u_i \gamma_i}$$

Основные параметры процесса применительно к *медному катоду*

$$\rho \approx 8.0 \text{ г/см}^3$$

 $\sigma \approx 1.37 \text{ H/M}$
 $R_0 = 2 \text{ мкм}$
 $u_i \approx 1.28 \times 10^4 \text{ м/c}$
 $\gamma_i \approx 3.9 \times 10^{-8} \text{ кг/Кл}$
 $P_0 \approx 2.33 \times 10^7 \text{ Па}$
 $I_{\min} \approx 1.18 \text{ A}$
 $T_0 \approx 51.2 \text{ Hc}$
 $L(T_0) \approx 7.68 \text{ мкм}$
 $U_{\max} \approx 206 \text{ м/c}$

Экспериментальные данные :

$$I_c = 1.6 \,\mathrm{A}$$

 $T = 25 - 50 \,\mathrm{Hc}$

Зависимости параметров процесса от R_0



21

Предложена аналитическая модель расплескивания жидкого металла в катодном пятне вакуумного дугового разряда; в рамках модели определены пространственные и временные характеристики этого процесса, такие как скорость истечения расплавленного металла из формирующихся кратеров, время образования струй, их количество.

Найдены минимальные значения давления плазмы и протекающего через отдельный кратер электрического тока, необходимые для реализации режима расплескивания жидкого металла и, как следствие, самоподдержания дугового разряда в рамках эктонной модели.

Численное моделирования вытеснения расплава



* 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

- Моделирование образования единичного кратера производилось И.В. Уймановым на основе методики, предложенной в [*]
- На рисунке: расчёт образования кратера для медного катода с *током ячейки 3.2 А* (пороговый ток 1.6 А)
- К моменту <u>t ≈ 10 нс</u> по контуру кратера образуется <u>жидкометаллический вал</u>
- Для анализа развития распада вала использовались <u>данные</u> численного моделирования:

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

Модификации, учитывающие 1. Дискретный спектр возмущений вала: $k_n(t) = \frac{n}{R(t)}$. особенности задачи:

2. Поправка s(t) ответственна за уменьшении азимутальной амплитуды возмущения за счёт растяжения вала.

$$\frac{d\ln A_n}{dt} = \gamma_n(t) + s(t)$$

I. Растяжение вала никак не влияет на амплитуды возмущений $s = s_{\text{max}} = 0$ s(t) = ?

II. Амплитуды возмущения вала прямо пропорциональны радиусу тора

 $s = s_{\min}(t) = \frac{d \ln r_0(t)}{dt} < 0$

Здесь γ_k – инкремент неустойчивости, k – волновое число, I_0 и I_1 – модифицированные функции Бесселя первого рода, σ – коэффициент поверхностного натяжения, ρ – плотность жидкости.

Результаты расчётов амплитуд возмущения



Видно, что характерное время развития неустойчивостей меньше времени дугового цикла.

Численное 2D моделирование для диапазона параметров



SN	1 _c ,	r ₀ ,	J ₀ ·10 [−] °,	$q_0 \cdot 10^{-12}$,	$p_0 \cdot 10^{-6}$,	t _s ,	d _{jet} ,
SIN	А	μm	A/cm ²	W/m ²	Pa	ns	mm
1	1.6	0.4	3.18	4.69	6.36	4.8	0.11
2	1.6	0.45	2.52	3.70	5.04	5.3	0.13
3	1.6	0.5	2.04	2.99	4.08	6.1	0.15
4	3.2	0.7	2.08	3.08	4.16	9.2	0.15
5	3.2	0.8	1.59	2.33	3.18	10.5	0.18
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
8	5	1.0	1.59	2.33	3.18	12.4	0.20
9	5	1.2	1.11	1.62	2.22	16.7	0.28
10	7	1.0	2.23	3.27	4.46	11.5	0.2
11	7	1.2	1.56	2.27	3.12	14.8	0.25
12	7	1.5	0.99	1.45	1.98	21.6	0.32

10.9

Для удобства далее будем использовать среднее значение оценки относительного роста амплитуд

$$b = \frac{1}{2} \frac{A_{n,\min}^{rel}(t) + A_{n,\max}^{rel}(t)}{A_n(t_0)} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{r_0(T)}{r_0(t_s)} \right) \exp\left(\int_{t_s}^{2t_s} \gamma_n(t) dt \right)$$

*

- Номер самой быстрорастущей моды *m_{max}*
- Относительный рост амплитуды этой моды $b(m_{\max})$

* 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.

Результаты расчётов для диапазона параметров



Установлено, что за развитие азимутальных неустойчивостей свободной поверхности жидкого металла, вытесняемого давлением плазмы из формирующихся кратеров катодного пятна вакуумной дуги, и последующее формирование струй ответственна имеющая капиллярную природу неустойчивость Релея-Плато. Подобный механизм образования струй реализуется в широком диапазоне токов ячеек катодного пятна и их размеров.

Научная новизна

- Продемонстрировано, что основные закономерности процесса расплескивания жидкого металла в катодном пятне вакуумной дуги могут быть описаны в рамках принципа гидродинамического подобия на основе сопоставления с процессом столкновения капель жидкости с твердой преградой. Сопоставление проводилось как для падения одиночных капель, так и для серии капель с заданным интервалом (он интерпретировался как период дугового цикла). Показано, что условия, реализующиеся в катодном пятне при околопороговых токах соответствуют условиям смены режимов движения жидкости (от ее растекания по катоду к расплескиванию – формированию струй и капель). Ранее подобных исследований не проводилось.
- Теоретически получен критерий формирования жидкометаллических струй и, следовательно, самоподдержания вакуумного дугового разряда, основанный на сравнении скорости истечения расплава из формирующихся кратеров и групповой скорости поверхностных волн.

Научная новизна

- Представлена аналитическая модель гидродинамических процессов в катодном пятне, ответственных за функционирование элементарной ячейки вакуумной дуги. Оценены основные временные и пространственные характеристики процесса, найдены минимальные значения давления плазмы и протекающего через кратер электрического тока, необходимые для расплескивания жидкого металла. Удалось продемонстрировать, что процесс образования струй носит пороговый характер.
- Установлено, что за образование и развитие микронеоднородностей, появляющихся при истечении жидкого металла из микрократеров на поверхности катода вакуумной дуги, в широком диапазоне токов ответственна неустойчивость Релея-Плато.

Благодарности

В заключение автор хотел бы выразить искреннюю признательность научному руководителю в.н.с. Лаборатории нелинейной динамики (ЛНД) Н.М. Зубареву за руководство работой и высокую научную требовательность к результатам. Автор также выражает глубокую благодарность заведующему ЛНД Н.Б. Волкову, в.н.с. Г.Ш. Болтачеву, н.с. Е.А. Кочурину за постоянное внимание к работе и помощь во многих вопросах, а также н.с. И.Ф. Пунанову за замечания к оформлению работы. Автор благодарен также всем сотрудникам ЛНД ИЭФ УрО РАН за помощь в работе и интерес к полученным результатам. Автор выражает особую признательность руководству и службам Института электрофизики УрО РАН за создание благоприятных условий для работы.