

ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД, ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВЫЙ РАЗРЯД УСКОРЕНИЕ ИОНОВ, ЭЛЕКТРОНОВ И РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕ- НИЕ В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

А.А. Андреев

*Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”
Харьков, Украина*

Рассмотрены механизмы появления в катодных пятнах вакуумной дуги ускоренных ионов, электронов и рентгеновского излучения. Эти явления связаны с импульсной природой токов в ячейках катодного пятна. На переднем фронте импульса тока за счёт индуцированного электрического поля ускоряются ионы прикатодной плазмы в сторону анода, появляется рентгеновское излучение из-за торможения на катоде электронов, ускоренных этим же полем в противоположном направлении. На заднем фронте импульса индуцированным полем ускоряются электроны в сторону анода.

PACS: 52.80.Mg

За последнее время в плазменных потоках микросекундных вакуумных дуг с токами около 10 А обнаружены металлические ионы с энергиями, достигающими 10 кэВ, в то время как при более длительных дугах энергия ионов обычно находится в пределах 100 эВ. Авторы объясняют увеличение энергии ионов гидродинамическим режимом увлечения частиц расширяющимся в вакуум электронным газом [1], газодинамическим ускорением плазменных потоков, обусловленных высоким градиентом давления плазмы вблизи катода [2,3], магнито-гидродинамическими силами, связанными с протекающим в плазменной струе током и приводящими к сжатию струи собственным магнитным полем [4,5]. Эти теории не в полной мере объясняют механизмы ускорения ионов, в особенности, что касается зависимости их энергии от кратности заряда.

В вакуумно-дуговой плазме обнаружены также потоки электронов, ускоренные до энергий 50...1000 эВ [6-8]. В низковольтном разряде при токах 10...20 А эти потоки представляют собой серию вспышек общей её длительностью около 50 нс, возникающих, главным образом, при погасании катодных пятен. В работе [6] энергия ускоренных электронов оценивается в 50 эВ, что более чем на порядок, превышает энергию электронов в плазме дугового разряда (1...3 эВ [9]). Предполагаемой причиной ускорения электронов автор [6] считает развитие плазменных волн при разрядных неустойчивостях, в частности, при погасании катодного пятна, что недостаточно убедительно. Согласно [8] электроны с энергией более 1 кэВ регистрируются при больших (более 100 кА) токах дуги (когда скорость возрастания тока достигает 10^{13} А/с).

Представляют интерес сведения о генерации импульсов рентгеновского излучения длительностью 0,03...1,5 нс из катодного пятна [8,10], причём эти импульсы совпадают по времени и длительности с импульсами потоков высокоэнергетичных ионов [8]. Установлено, что при напряжении разряда 2,7 кВ длительность импульсов рентгеновского излучения составляет 30...200 пикосекунд. При более низких напряжениях (до 150 В) их длительность колеблется в диапазоне 0,03...2,5 нс. Излучение происходило из отдельных центров (их может быть несколько) размерами около 0,6...3 мкм. Автор [10] объясняет

причины возникновения и параметры пучков рентгеновского излучения процессами, связанными с быстрыми изменениями собственного магнитного поля ячейки в её плазменном канале диаметром 2 мкм и плотностью 10^{26} м⁻³, которые приводят к флуктуациям электрического поля до нескольких киловольт и более.

По-видимому, существуют несколько механизмов ускорения ионов и электронов. Причины возникновения рентгеновского излучения требуют дополнительного рассмотрения. В данной статье рассматриваются механизмы ускорения ионов, электронов и появления рентгеновского излучения, объединённые единой электронно-магнитной моделью катодного пятна [11].

Катодное пятно состоит из значительного количества (до нескольких десятков) одновременно существующих ячеек с диаметром порядка 1 мкм. Ток через ячейку представляет собой импульс длительностью 10^{-7} ... 10^{-9} с, длительность его переднего и заднего фронтов порядка 10^{-9} с [12,13]. Амплитуда тока в импульсе составляет несколько ампер [12]. Во время прохождения импульса тока в результате изменения собственного магнитного поля ячейки в её окрестностях индуцируются электрические поля, величина которых достигает более $3,5 \cdot 10^7$ В/см [14]. Под действием этих полей по периметру ячейки, где магнитные поля максимальны и, соответственно, максимальны dH/dt , протекают индуцированные токи, аналогичные гало-токам, возникающим в плазме токамака при прохождении по ней импульсов разрядного тока и направленными противоположно ему, т.е. по периметру токового канала $E_{\parallel} > E_0$ [15]. Таким образом, вокруг ячейки у поверхности катода образуются скрещённые $E \times H$ -поля, величина которых убывает с увеличением от центра ячейки как $1/R$ [11].

При увеличении тока индуцированное электрическое поле E_{\parallel} направлено противоположно основному E_0 (Рис.1).

Ионы из прикатодной плазмы движутся в направлении анода, ускоряясь до энергий, определяемых полем $E = E_{\parallel} - E_0$ (поскольку по периметру ячейки $E_{\parallel} > E_0$). Энергия ускоренных ионов зависит от скорости возрастания тока в ячейке и, как видно из Рис.2, может достигать 1 кэВ.

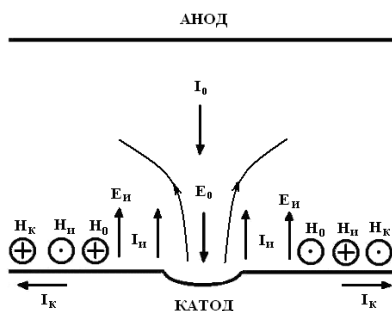


Рис.1. Схема электрических и магнитных полей ячейки при возрастании в ней тока. $E_0, E_{и}$ – основное и индуцированное электрические поля; $I_0, I_{и}$ – основной и индуцированный токи ячейки; I_K – ток, протекающий по катоду; $H_0, H_{и}, H_K$ – магнитные поля, созданные этими токами [11]

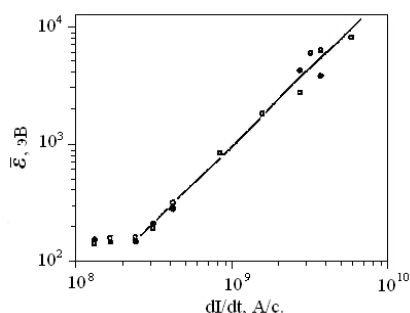


Рис.2. Зависимость средней энергии ионов от скорости возрастания тока в вакуумной дуге для ионов Cu^+ (□) Cu^{2+} (●) [16]

Однако вследствие высокой плотности прикатодной плазмы (порядка 10^{26} м^{-3} [17]) они теряют энергию и кратность заряда на столкновениях с её частицами. Поэтому средняя энергия и заряд ионов уменьшаются с увеличением коэффициента эрозии катода, который непосредственно характеризует плотность и объём плазменного факела [2,3]. В частности, они уменьшаются по мере увеличения температуры катода [18], когда растёт коэффициент эрозии [13]. Как видно из табл. 1 и 2 даже относительно небольшое изменение температуры катода приводит к существенному снижению средней энергии и кратности заряда ионов.

Таблица 1. Влияние температуры катода на среднюю энергию ионов и зарядовый состав ионного компонента плазменных потоков при $I_0 = 100 \text{ А}$, $p = 7 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ [18]

$T_k, \text{ К}$	$E_{iz}/Z, \text{ эВ}$			$n_{iz} \cdot v_{iz} / \sum n_{iz} \cdot v_{iz}, \%$		
	Ti^{1+}	Ti^{2+}	Ti^{3+}	Ti^{1+}	Ti^{2+}	Ti^{3+}
390	57	35	21	17	81	2
620	33	22,5	9	29	69	2
770	32	22	7	34	65	1

Поэтому высокоэнергетичные ионы фиксируются при кратковременных дугах (микросекундных), когда поверхность катода не успевает нагреться, и отсутствуют при длительных (миллисекундных и более), когда повышается температура этой поверхности. В случаях, когда $dI/dt \sim 10^{13} \text{ А/с}$, например, при высоковольтных пробоях, индуцированное

электрическое поле $E_{и}$ соответственно на четыре порядка больше по сравнению с обычной низковольтной дугой и количество высокоэнергетичных ионов и их энергии существенно возрастают [2,3,16].

Таблица 2. Зависимость относительного содержания ионов молибдена различной кратности заряда в плазменном потоке от интегральной температуры катода и тока дуги ($p = 7 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$) [18]

$T_k, \text{ К}$	$I_0, \text{ А}$	$n_{iz} v_{iz} / \sum n_{iz} v_{iz}, \%$					
		Mo^{1+}	Mo^{2+}	Mo^{3+}	Mo^{4+}	Mo^{5+}	Mo^{6+}
410	90	3	47	39	9	1,5	0,5
560	90	5	83	11	1	0,5	–
560	220	6	82	10	2	–	–

Одновременно индуцированное электрическое поле $E_{и}$ ускоряет электроны прикатодной плазмы в сторону катода, где они тормозятся у его поверхности, вызывая рентгеновское излучение [8,10], всплески которого совпадают во времени с импульсами высокоэнергетичных ионов [8]. В низковольтной дуге величина dI/dt составляет порядка 10^9 А/с , $E_{и}$, следовательно, ускорение электронов относительно невелико [6] и излучение практически отсутствует. При увеличении напряжения на дуге скорость изменения тока существенно увеличивается, о чём можно судить по длительности импульса излучения (0,03...0,2 нс), – излучение становится более жёстким [10]. Это же подтверждается и в работе [8], где в высоковольтной дуге при токах 100 кА и соответственно dI/dt около 10^{13} А/с электроны ускоряются до высоких энергий и рентгеновское излучение жёсткое.

При уменьшении тока ячейки (на заднем фронте импульса) индуцированное электрическое поле $E_{и}$ совпадает по направлению с основным (Рис.3).

Оно ускоряет ионы в сторону катода, а электроны в сторону анода. При погасании катодного пятна, когда большинство ячеек гаснет за короткое время (~ 50 нс), суммарный поток ускоренных электронов хорошо заметен. При малых токах дуги (10...20 А), когда dI/dt относительно невелико, энергия электронов составляет ~50 эВ [6]; при $dI/dt \sim 10^{13} \text{ А/с}$ их энергия превышает 1 кэВ [8].

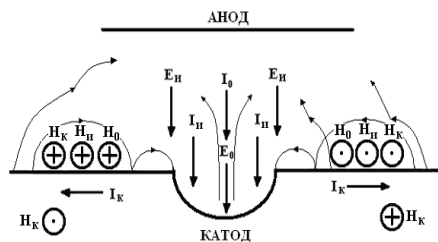


Рис.3. Схема электрических и магнитных полей ячейки при снижении в ней тока [10]

Таким образом, ускорение ионов, рентгеновское излучение и его совпадение во времени с импульсами высокоэнергетичных ионов, импульсы ускоренных электронов можно объяснить при помощи электроно-магнитной модели катодного пятна [11].

ВЫВОДЫ

1. Одной из причин появления высокоэнергетич- ных ионов в плазменных потоках вакуумной дуги является их ускорение индуцированным электрическим полем $E_{\text{и}}$, которое возникает во время прохождения переднего фронта импульса тока в ячейке катодного пятна и направлено против основного электрического поля. При прохождении прикатодной плазмы эти ионы частично теряют значительную часть энергии и кратности заряда. Этим можно объяснить зависимость энергии и кратности заряда ионов от коэффициента эрозии катода, в том числе и от его температуры.

2. При спаде тока ячейки индуцированное электрическое поле $E_{\text{и}}$, совпадающее по направлению с основным, может ускорять электроны прикатодной плазмы в сторону анода до величин в несколько кэВ. При погасании катодного пятна, когда большинство ячеек гаснут за короткое время, потоки ускоренных электронов суммируются и их потоки более заметны.

3. Во время переднего фронта тока в ячейке индуцированное электрическое поле $E_{\text{и}}$ ускоряет электроны прикатодной плазмы в направлении катода, что является причиной появления тормозного рентгеновского излучения с его стороны. При малых токах (<100 А) низковольтной дуги рентгеновское излучение практически отсутствует.

ЛИТЕРАТУРА

1. I.A. Krinberg, M.P. Lukovnikova, V.L. Paperny. Steady-state expansion of current-carrying plasma into vacuum // *Sov. Phys. JETP*. 1990, v.70 (3), p.451-459.
2. I.I. Beilis. Ion acceleration in vacuum arc cathode plasma jets with large rates of current rise // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2005, v.33, №5, p.1537-1541.
3. I.I. Beilis. Nature of high-energy ions in the cathode plasma jet of a vacuum arc with high rate of current rise // *Applied Physics Letters*. 2004, v.85, №14, p.2739-2740.
4. С.П. Горбунов, В.И. Красов, В.Л. Паперный. Протяжённая область «аномального» ускорения в катодной струе вакуумного разряда // *Письма в ЖТФ*. 1998, т.24, №4, с.66-70.
5. I.A. Krinberg, V.L. Paperny. Pinch effect in vacuum arc plasma sources under moderate discharge currents // *J. Phys. D: Appl Phys*. 2002, v.35, p.549-562.
6. I.L. Musukin. Time-resolved investigations of the accelerated electron flow from the cathode region of a

vacuum arc // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2005, v.33, №5, p.1560-1563.

7. S.A. Popov, D.I. Proskurovsky, A.V. Batrakov. Formation of accelerated electron flows in a low-current pulsed vacuum discharge. Proc. 19-th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Xi'an. 2000, p.252-255.

8. V.I. Baryschnikov and V.L. Paperny. On electron temperature in the cathode plasma of a pulse vacuum discharge // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1995, v.28, p.2519-2521.

9. В.М. Лунёв, В.Г. Падалка, В.М. Хороших. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги // *ЖТФ*. 1977, т.47, с.1491-1496.

10. N. Vogel. X-ray radiation from cathode spot fragments in laser-induced vacuum discharges // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 1999, v.27, №4, p.864-871.

11. А.А. Андреев. Электронно-магнитная модель катодного пятна // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (3)*. 2003, №4, с.203-207.

12. И.Г. Кесаев. Катодные процессы вакуумной дуги. М.: «Наука», 1968.

13. B. Juttner, V.F. Pushkarev, E. Hantzshe, I. Beilis. Cathode Spots // *Handbook of Vacuum Arc Science and Technology*. R.L. Boxman, P. Martin, D. Sanders (editors), Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1995.

14. А.М. Зимин, В.А. Иванов, Б. Ютгнер. Динамика катодных пятен на поверхности бериллия в дуговом разряде // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. 2001, вып.2, с.44-50.

15. G. Martin. Halo Currents in a Circular Tokamak: Measurements on TORE-SUPRA. Proc. 26 EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics. Maastricht, 1999, ECA, v.231, p.969-972.

16. N.V. Astrakhantsev. V.I. Krasov, V.L. Paperny. Ion acceleration in a pulse vacuum discharge // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1995, v.28, №12, p.2514-2518.

17. A. Batrakov, S. Popov, N. Vogel, et al. Plasma parameters of an arc cathode spot at the low-current vacuum discharge // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2005, v.31, №5, p.817-821.

18. И. Аксёнов, В.Г. Брень, И.И. Коновалов и др. Исследование плазмы стационарного вакуумного разряда. II. Влияние температуры катода // *Теплофизика высоких температур*. 1983, т.21, №4, с.646-651.

IONS, ELECTRONS ACCELERATION AND X-RAY IN A CATHODE SPOT OF VACUUM ARC

A.A. Andreev

The causes of appearance of accelerated ions, electrons and X-rays in cathode spots were considered. These phenomena are connected with pulse nature of the currents in cathode spot sells. On the forward current pulse front, because of induced electric field, plasma ions near cathode are accelerated to the anode side, and thus X-rays because of braking electrons, which were accelerated by same electric field, are appeared. On the back pulse front the electrons are accelerated by the induced electric field to anode side.

ПРИСКОРЕННЯ ІОНІВ, ЕЛЕКТРОНІВ І РЕНТГЕНІВСЬКЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ В КАТОДНІЙ ПЛЯМІ ВАКУУМНОЇ ДУГИ

A.O. Andreev

Розглянуті механізми виникнення в катодних плямах вакуумної дуги прискорених іонів, електронів і рентгеновського випромінювання. Ці явища зв'язані з імпульсною природою струмів в чарунках катодної плями. На передньому фронті імпульсу струму за рахунок індукованого електричного поля прискорюються іони прикатодної плазми в бік анода, з'являється рентгеновське випромінювання через гальмування на катоді

електронів, прискорених цим же полем в протилежному напрямку. На задньому фронті імпульсу в бік аноду індукованим полем прискорюються електрони.