

04

## Влияние дейтерирования катода на параметры вакуумно-дуговой плазмы

© Д.Л. Шмелев<sup>1</sup>, С.А. Баренгольц<sup>2,3</sup>, Н.Н. Щитов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

<sup>2</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>3</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

E-mail: sb@nsc.gpi.ru

<sup>4</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва

Поступило в Редакцию 21 апреля 2014 г.

Предложена модель для оценки влияния относительного содержания дейтерия в циркониевом катоде на свойства плазмы вакуумной дуги. Показано, что окклюдирование дейтерия в катоде приводит к дополнительным затратам энергии на его ионизацию и, как следствие, уменьшению среднего заряда ионов материала катода в дуговой плазме. Дейтерий в катодном пятне полностью ионизуется, а дрейфовая скорость движения его ионов практически совпадает со скоростью ионов катодного материала.

Ионный источник на основе вакуумного разряда является основным элементом вакуумных нейтронных трубок [1]. Электроды источника — катод и анод — содержат рабочий газ (изотопы водорода) в окклюдированном состоянии. Выделение и образование ионов дейтерия происходит при инициации кратковременного ( $\sim 1 \mu\text{s}$ ) искродугового разряда между катодом и анодом. Разряд сопровождается эрозией поверхности электродов, приводящей к генерации ионов рабочего газа, — желаемый процесс, и испарением металлической основы — побочный, вредный эффект. Оптимизация рабочих характеристик источника ионов, т.е. его удельного выхода (отношения количества ионов рабочего газа к энергии, потребляемой в импульсе), ресурса и стабильности, предполагает адекватное описание разряда.

В данной работе предложена модель для оценки влияния относительного содержания дейтерия в циркониевом катоде на свойства плазмы вакуумной дуги. В основе модели лежит эктонный механизм функционирования катодного пятна вакуумной дуги [2]. Согласно этому

механизму, плазма вакуумной дуги формируется в результате функционирования отдельных ячеек (взрывоэмиссионных центров) катодного пятна вакуумной дуги. К настоящему моменту их существование не вызывает сомнения [2–4]. Рост тока дуги сопровождается простым увеличением количества одновременно функционирующих ячеек катодного пятна. В связи с этим параметры ионного потока не зависят или слабо зависят от тока дуги вплоть до килоамперного [5].

Ток ячейки пятна составляет единицы ампер, а плотность тока в основании плазменной струи находится на уровне  $10^8$  А/см<sup>2</sup> [2,3], характерном для взрывной электронной эмиссии. В течение длительного времени реализация условий для возникновения взрывной электронной эмиссии в катодном пятне вакуумной дуги подвергалась сомнению. Однако сегодня можно утверждать, что взаимодействие плотной прикатодной плазмы с микрон неоднородностями на катоде неизбежно приводит к иницированию взрывной электронной эмиссии [6–8].

В нашей модели предполагается, что в катодном пятне дейтерированного циркониевого электрода дейтерий и цирконий эродируют совместно, причем относительная скорость эрозии компонент соответствует степени насыщенности электрода дейтерием и не меняется со временем. Скорее всего, это не так в силу чрезвычайной сложности процессов сорбции/десорбции изотопов водорода и резкой зависимости скорости диффузии и десорбции от температуры. Однако в начальный период времени работы источника ионов, пока электроды в целом еще не сильно нагреты, допущение вполне оправдано. Таким образом, поставщиком дейтерия в дуговую плазму являются непосредственно катодные пятна. Далее, считаем, что разлет плазмы сферически симметричен, следовательно, можно ограничиться одномерным приближением. В этом случае поведение трехкомпонентной плазмы (электроны, цирконий и дейтерий) в плазменной струе катодного пятна описывается при помощи следующих уравнений гидродинамики [9]:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 n_i u_i = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_d}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 n_d u_d = 0, \quad (2)$$

$$m_i n_i \frac{du_i}{dt} = - \frac{\partial P_i}{\partial r} - \frac{n_i}{n_e} \frac{\partial P_e}{\partial r} + \alpha m_e v_{ei} (n_e - z n_i) (u_e - u_i) - \alpha m_e z n_i v_{ed} (u_e - u_d) + m_d n_d v_{id} (u_d - u_i), \quad (3)$$

$$m_d n_d \frac{du_d}{dt} = -\frac{\partial P_d}{\partial r} - \frac{n_d}{n_e} \frac{\partial P_e}{\partial r} + \alpha m_e v_{ed} (n_e - n_d) (u_e - u_d) - \alpha m_e n_d v_{ei} (u_e - u_i) - m_d n_d v_{id} (u_d - u_i), \quad (4)$$

$$n_i \frac{dT_i}{dt} + \frac{2P_i}{3r^2} \frac{\partial r^2 u_i}{\partial r} = \frac{2m_e z n_i v_{ei}}{m_i} (T_e - T_i) + \frac{2m_d n_d v_{id}}{m_i} (T_d - T_i), \quad (5)$$

$$n_d \frac{dT_d}{dt} + \frac{2P_d}{3r^2} \frac{\partial r^2 u_d}{\partial r} = \frac{2m_e n_d v_{ed}}{m_d} (T_e - T_d) - \frac{2m_d n_d v_{id}}{m_i} (T_d - T_i) + \frac{2}{3} m_d n_d v_{id} (u_d - u_i)^2, \quad (6)$$

$$n_e = z n_i + n_d, \quad u_e = (z n_i u_i + n_d u_d - J/e)/n_e, \quad (7)$$

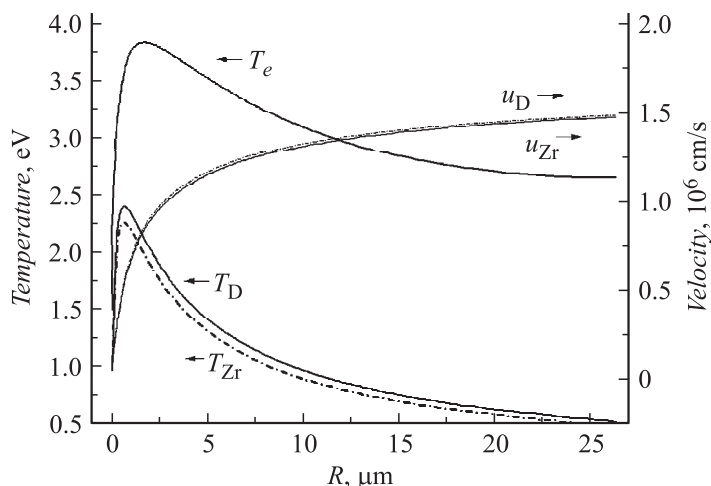
$$\begin{aligned} n_e \frac{dT_e}{dt} + \frac{2P_e}{3r^2} \frac{\partial r^2 u_e}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \frac{r^2 \gamma n_e T_e}{m_e (v_{ei} + v_{ed})} \frac{\partial T_e}{\partial r} \\ = -U_{ioniz} + \frac{2m_e z n_i v_{ei}}{m_i} (T_i - T_e) + \frac{2m_e n_d v_{ed}}{m_d} (T_d - T_e) \\ + \frac{2}{3} \alpha m_e (z n_i v_{ei} (u_e - u_i)^2 + n_d v_{ed} (u_e - u_d)^2), \end{aligned} \quad (8)$$

где индексы  $i, d, e$  обозначают параметры, относящиеся соответственно к ионам циркония, дейтерия и электронам. Параметры  $n, u, T, P$  — соответственно плотность, дрейфовая скорость, температура и давление компоненты плазмы;  $\alpha, \gamma$  — коэффициенты Брагинского [9];  $v$  — частота столкновения компонент, соответствующих индексу;  $J$  — плотность тока;  $z$  — среднее зарядовое число ионов циркония;  $U_{ioniz}$  — энергия, расходуемая на ионизацию.

Для определения ионизационного состава плазмы и  $z$  в дополнение к уравнениям (1)–(8) решалась система уравнений для парциальных концентраций вида

$$\frac{dc_j}{dt} = n_e (\alpha_{j-1} c_{j-1} - \beta_j c_j n_e - \alpha_j c_j + \beta_{j+1} c_{j+1} n_e), \quad (9)$$

где  $c_j$  — парциальная концентрация ионов с зарядом  $j$  ( $c_j = n_j/N$ ,  $N$  — полная плотность ионов),  $\alpha_j$  и  $\beta_j$  — коэффициенты ударной ионизации и тройной рекомбинации соответственно [10]. Уравнения

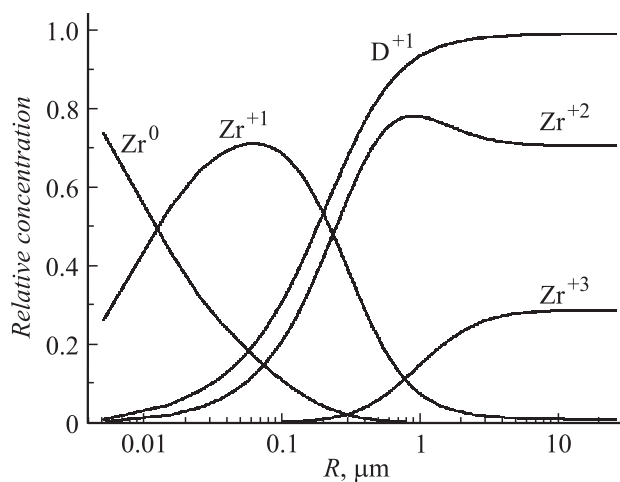


**Рис. 1.** Зависимости температуры электронов  $T_e$ , ионов циркония  $T_{Zr}$ , дейтерия  $T_D$  и скоростей ионов циркония  $u_{Zr}$ , дейтерия  $u_D$  от расстояния,  $k = 1$ .

вида (9) записывались для компонент  $Zr^n$  и  $D^m$ , где  $n = 0.1, \dots, 4$ ,  $m = 0.1$ .

Радиус ячейки пятна принимался равным  $1 \mu\text{m}$ , плотность тока в пятне  $10^8 \text{ A/cm}^2$  [2,3]. Граничные условия на катоде дозвуковые, задавался поток частиц и температура. Поток частиц определялся из заданной удельной эрозии. Удельная эрозия циркония  $g_{Zr} = 3.6 \cdot 10^{-5} \text{ g/C}$  [11], плотность потока циркония  $f_{Zr} = J \cdot g_{Zr}/m_i$ , плотность потока дейтерия  $f_D = k f_{Zr}$ , где  $k$  — относительное содержание дейтерия в электроде. Температура электронов на катодной границе  $1.5 \text{ eV}$ , температура ионов циркония и дейтерия  $1 \text{ eV}$ . Эти величины получены из решения кинетической модели [8], в которой эти температуры непосредственно вычисляются. На внешней границе конуса граничные условия сверхзвуковые, электронный тепловой поток отсутствовал.

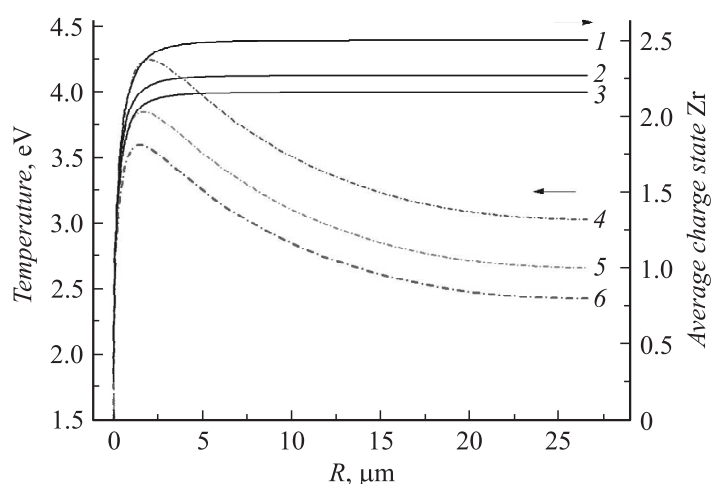
Длина расчетного домена (образующей сферического конуса)  $30 \mu\text{m}$ . Ее выбор связан с тем, что на расстояниях до  $10 \mu\text{m}$  от катода происходит „закалка“ ионизационного состава плазмы, который в дальнейшем не меняется [12–14]. Угол раствора сферического конуса выбирался из сравнения результатов тестовых расчетов с  $k = 0$  с зарядовым составом и средним зарядовым числом ионов при горении дуги на чистом



**Рис. 2.** Относительные концентрации атомов и ионов циркония и дейтерия в зависимости от расстояния от катодного пятна,  $k = 1$ .

циркониевом катоде [4]. Было получено, что полуугол раствора разлета струи должен быть равен  $\sim 54.5^\circ$ . Этот угол оставался неизменным при всех  $k$ .

Система (1)–(9) с описанными выше граничными условиями решалась численно методом конечного объема до получения стационарного решения. На рис. 1 показаны характерные распределения температур и скоростей ионов вдоль струи для плазмы с относительным содержанием дейтерия  $k = 1$ . Температура электронов достигает максимума  $\sim 3.85$  eV на расстоянии  $1.5 \mu\text{m}$  от катода и далее монотонно уменьшается, нагрев электронов обусловлен эффектом Джоуля. Температуры ионов также имеют максимум вблизи  $1 \mu\text{m}$ , нагрев ионов обусловлен частыми электрон-ионными столкновениями в области плотной плазмы. Охлаждение электронов и ионов происходит за счет работы сил давления. Скорости ионов достигают характерной для вакуумных дуг с циркониевыми катодами величины  $1.5 \cdot 10^6$  cm/s [4]. Из рисунка видно, что дрейфовые скорости ионов циркония и дейтерия практически совпадают, что объясняется частыми ион-ионными столкновениями в области плотной плазмы катодного пятна. Масса циркония существенно больше массы дейтерия, поэтому скорости ионов определяются именно



**Рис. 3.** Средний заряд ионов циркония ( $1 - k = 0$ ;  $2 - k = 1$ ;  $3 - k = 2$ ) и электронная температура ( $4 - k = 0$ ;  $5 - k = 1$ ;  $6 - k = 2$ ) в зависимости от расстояния от катодного пятна.

дрейфовой скоростью ионов циркония. Следует отметить, что в случае однокомпонентных катодов скорости ионов в значительной степени зависят от массы ионов (см., например, [15]). Тем не менее в недавних экспериментах по исследованию параметров дуговой плазмы для катодов Ti-C, Ti-AL и Ti-Si скорости ионов различных компонентов практически совпадали и не зависели при этом от зарядового состояния [16].

На рис. 2 показаны зависимости парциальных концентраций ионов циркония и дейтерия от расстояния от катодного пятна. Из представленных графиков видно, что цирконий становится полностью ионизованным уже на расстоянии  $\sim 0.3 \mu\text{m}$ , дейтерий на расстоянии  $\sim 1 \mu\text{m}$ . На расстоянии  $\sim 10 \mu\text{m}$  относительные концентрации ионов циркония перестают меняться с расстоянием — наступает „закалка“ ионного состава. С увеличением относительного содержания дейтерия  $k$  в катоде уменьшаются среднее зарядовое число ионов циркония и температура электронов в плазменной струе (рис. 3). Происходит это из-за увеличения полной плотности частиц в катодной струе, что приводит к увеличению доли энергии, затрачиваемой на ионизацию. Поэтому

Зарядовый состав ионов циркония в зависимости от содержания дейтерия

$k$	$Zr^{+1}$	$Zr^{+2}$	$Zr^{+3}$	$Zr^{+4}$	$Z$
0	0.002	0.49	0.502	0.006	2.512
0.5	0.003	0.612	0.382	0.003	2.385
1	0.007	0.707	0.285	0.001	2.28
1.5	0.011	0.765	0.223	0.001	2.214
2	0.016	0.802	0.181	0.001	2.167

относительное увеличение потока дейтерия приводит к уменьшению концентрации в основном трехзарядных ионов циркония и соответствующему уменьшению среднего заряда ионов циркония в катодной струе вакуумной дуги. Результаты моделирования для различных  $k$  приведены в таблице.

Таким образом, в рамках предложенной модели для оценки влияния дейтерирования катода на параметры плазмы вакуумной дуги можно сделать следующие выводы. Окклюдование дейтерия в катоде приводит к дополнительным затратам энергии на его ионизацию и, как следствие, уменьшению среднего заряда ионов материала катода в дуговой плазме. Дейтерий в катодном пятне полностью ионизируется, а дрейфовая скорость движения его ионов практически совпадает со скоростью ионов катодного материала из-за высокой частоты ион-ионных столкновений в прикатодной области.

Точность современных методик исследования параметров ионов дуговой плазмы (см., например, [4]) вполне достаточна для того, чтобы проверить сделанные выводы. Кроме этого, проведение таких экспериментов позволит оценить долю ионов дейтерия, поступающих в дуговую плазму непосредственно из катодных пятен вакуумной дуги.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-08-13501-офи\_м\_РА.

## Список литературы

- [1] *Кирьянов Г.И.* Генераторы быстрых нейтронов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 224 с. (*Kiryayov G.I.* Fast neutron generators. M.: Energoatomizdat, 1990. 224 p. (in Russian).)
- [2] *Mesyats G.A.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. P. 676.

- [3] *Месяц Г.А.* Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с. (*Mesyats G.A.* Cathode phenomena in a vacuum discharge: the breakdown, the spark and the arc. Moscow: Nauka, 2000. 400 p.)
- [4] *Anders A.* Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation. N. Y.: Springer, 2008.
- [5] *Месяц Г.А., Баренгольц С.А.* // УФН. 2002. Т. 172. № 10. С. 1113. (*Mesyats G.A., Barengol'ts S.A.* // Physics-Uspokhi. 2002. V. 45. P. 1001.)
- [6] *Uimanov I.V.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2003. V. 31. P. 822.
- [7] *Баренгольц С.А., Месяц Г.А., Цветух М.М.* // ЖЭТФ. 2008. Т. 134. В. 6. С. 1213. (*Barengol'ts S.A., Mesyats G.A., Tsvetoukh M.M.* // JETP. 2008. V. 107. P. 1039.)
- [8] *Shmelev D.L., Barengol'ts S.A.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. P. 1959.
- [9] *Брагинский С.И.* // Вопросы теории плазмы. Т. 1. / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Госатомиздат, 1963. С. 183. (*Braginskii S.I.* // Review of Plasma Physics / Ed. by M.A. Leontovich. N. Y.: Consultants Bureau, 1965. V. 1. P. 205.)
- [10] *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 2-е изд., доп. М.: Наука, 1966. 688 с. (*Zel'dovich Ya.B., Raizer Yu.P.* Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamics phenomena. N. Y.: Acad. Press, 1966. V. 1. 464 p. V. 2. 451 p.)
- [11] *Anders A., Oks E.M., Yushkov G.Y., Savkin K.P., Brown I.G., and Nikolaev A.G.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. V. 33. P. 1532.
- [12] *Баренгольц С.А., Месяц Г.А., Шмелев Д.Л.* // ЖЭТФ. 2001. Т. 120. С. 1227. (*Barengol'ts S.A., Mesyats G.A., Shmelev D.L.* // JETP. 2001. V. 93. P. 1065.)
- [13] *Barengol'ts S.A., Mesyats G.A., Shmelev D.L.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2003. V. 31. P. 809.
- [14] *Krinberg I.A., Lukovnikova M.P.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1996. V. 29. P. 2901.
- [15] *Кринберг И.А.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. С. 25. (*Krinberg I.A.* // Technical Physics. 2001. V. 46. P. 1371.)
- [16] *Zhirkov I., Eriksson A.O., Rosen J.* // J. Appl. Phys. 2013. V. 114. P. 213 302.