

ЭЛЕКТРОННО-МАГНИТНАЯ МОДЕЛЬ КАТОДНОГО ПЯТНА ВАКУУМНОЙ ДУГИ

А.А. Андреев

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
г. Харьков, Украина*

Рассматривается движение электронов в окрестностях ячейки катодного пятна. Ток ячейки, который представляет собой импульс с передним и задним фронтами длительностью около $5 \cdot 10^{-9}$ с, создаёт вокруг неё магнитное поле. Во время прохождения этих фронтов тока через ячейку в её окрестностях индуцируются электрические поля, достигающие $3,5 \cdot 10^7$ В/см. Таким образом, вокруг ячейки у поверхности катода возникают скрещенные $E \times H$ -поля, величины которых убывают с увеличением расстояния от центра ячейки как $1/R$. Под действием электрических полей по периметру токового канала ячейки протекают токи, аналогичные гало-токам, возникающим в плазме Токамака при прохождении по ней импульсов разрядного тока. При увеличении тока ячейки гало-токи направлены противоположно ему, т.е. электроны движутся к катоду, а ионы ускоряются в сторону анода. При спаде тока индуцированное электрическое поле вызывает с поверхности катода автоэмиссию электронов, которые в скрещённых $E \times H$ -полях движутся по циклоидам в направлении центра ячейки, десорбируя газы и создавая поверхностную плазму (ореол) вокруг неё. Эти электроны взаимодействуют с внешним магнитным полем и в направлении, где сумма магнитных полей (внешнего и собственного) максимальна, плотность поверхностной плазмы вблизи катодного пятна увеличивается, что определяет преимущественное направление его движения. С помощью предложенной модели можно качественно объяснить появление слабого свечения вокруг катодного пятна, существование различных типов катодных пятен, их деление, обратное движение в тангенциальных магнитных полях и т.п.

1. ВВЕДЕНИЕ

Катодные пятна являются очень важным явлением в вакуумных дугах. Их изучению посвящены фундаментальные труды и многие публикации в научных журналах, например, [1-3]. Однако до сих пор не существует общепринятого объяснения некоторых их свойств, в том числе и такого явления, как обратное движение в тангенциальном магнитном поле.

Катодные пятна (КП) существуют в виде ярко светящихся точек, быстро перемещающихся по поверхности катода. КП бывают 1-го типа, существующие в низком вакууме и при наличии на катоде диэлектрических плёнок или различных загрязнений, КП 2-го типа, образующиеся на очищенных (в частности, катодным пятном) поверхностях и при высоком вакууме, и КП 3-го типа, появляющиеся при больших токах, главным образом, на катодах с высоким упругим давлением паров.

Для КП 1-го типа характерны высокая скорость перемещения (100...500 м/с) и низкая эрозия (3,5...13 мг/К). Судя по свечению плазмы, диаметр этих пятен, например, для бериллия, составляет 460 мкм [4]. Внутренняя структура КП 1-го типа состоит из значительного числа (нескольких десятков) одновременно существующих ячеек с размерами порядка нескольких микрометров и менее [4]. На медном катоде КП диаметром 50...80 мкм состоят из фрагментов с размерами 5...30 мкм и с током 10...30 А на фрагмент. В свою очередь, фрагменты имеют тонкую внутреннюю структуру в виде одновременно существующих ячеек с размерами около нескольких микрометров

[5]. Внутри КП 1-го типа ячейки находятся друг от друга на расстоянии 20...50 мкм [6].

КП 2-го типа обладают скоростями перемещения на два порядка меньшими и эрозией примерно на два порядка больше, чем КП 1-го типа [2]. Диаметр такого пятна, оценённый по ширине пика яркости, составляет 10...40 мкм, и его тонкая внутренняя структура в виде ячеек просматривается слабее [2,4].

КП 3-го типа малоподвижны, с большим количеством капельной фазы, существуют преимущественно на легкоплавких металлах [7].

Время существования ячейки (эктона) [3] составляет 10^{-7} ... 10^{-9} с, ток ячейки от долей до нескольких ампер, диаметр, судя по диаметрам расплавленных кратеров, от 1 мкм и более, плотность тока $> 10^8$ А/см² [1-3]. По другим данным время существования ячейки составляет $3 \cdot 10^{-6}$ с [6].

Ускорение и увеличение кратности заряда ионов происходит в пределах расстояния $2 \cdot 10^{-4}$ см от катода. После $5 \cdot 10^{-4}$ см прекращаются реакции в плазме, и далее её состав не меняется [15]. Вблизи катода температура электронов не превышает 5 эВ [3].

Вокруг КП как 1-го, так и 2-го типа существует ореол свечения плазмы, интенсивность которого спадает в 2-3 раза на расстоянии около 400 мкм по мере удаления от границы КП [4].

При распаде одних ячеек возникают другие внутри пятна или вне его границ в пределах плазменного ореола. В последнем случае вокруг новой ячейки образуются другие и таким образом создается новое КП. Поэтому КП перемещается «прыжками» на расстояния до 300 мкм и более [4,5],

и его скорость движения определяется величиной этих «прыжков».

При увеличении тока разряда количество ячеек в КП и его размеры увеличиваются, затем КП делится на фрагменты, существующие самостоятельно. После деления они отталкиваются друг от друга [1]. Величина тока, при котором КП устойчиво существует, зависит от материала катода, его типа (плёночный или массивный), величины внешнего магнитного поля, давления газа, параметров внешней электрической цепи и др. В частности, токи, при которых КП начинает делиться, на плёночных катодах составляют доли ампер и возрастают с увеличением толщины плёнки до нескольких ампер. На массивных катодах они составляют десятки ампер [1]. В отсутствие внешних магнитных полей КП хаотически перемещается по катоду, однако на протяжённом катоде оно всегда движется к месту подключения источника питания дугового разряда [8].

При наличии внешнего тангенциального магнитного поля для КП 1-го типа характерно возникновение сильного ореола, вытянутого в направлении последующего движения пятна (в «антиамперовом» направлении), представляющего собой плазменный поток со скоростью фронта 5...10 км/с. Для КП 2-го типа в магнитном поле ореол также имеет несимметричное распределение яркости свечения плазмы и вытянут в сторону обратного движения. КП как 1-го, так и 2-го рода движутся в сторону, противоположную предписываемой правилом Ампера, в пределах угла $\pm 45^\circ$ к его направлению [5].

Скорость КП увеличивается с увеличением тока через него [2,9]. Если магнитное поле увеличивается до величин порядка 1 Тл и более, КП меняет направление движения на противоположное, т.е. при дальнейшем увеличении магнитного поля движется согласно правилу Ампера [10].

2. ЭЛЕКТРОННО-МАГНИТНАЯ МОДЕЛЬ КАТОДНОГО ПЯТНА

Предлагаемая модель катодного пятна упрощена, она не учитывает влияния паров, плазмы и капель материала катода, гидродинамических процессов в ячейке и т.п. и касается в основном его перемещения по поверхности катода.

Магнитное поле, создаваемое током через эмиссионный центр ячейки, можно оценить из формулы зависимости для поля линейного проводника с током $B = \mu_0 I / \pi D$, где D – диаметр токового канала.

В окрестностях ячейки существует круговое тангенциальное магнитное поле $H_{\text{я}}$, созданное током через ячейку $I_{\text{я}}$. Для T_i величина тока $I_{\text{я}}$ (равная удвоенному значению порогового тока) в случае массивного катода составляет 4 А [1]. Тогда при диаметре ячейки $1 \cdot 10^{-4}$ см [3] собственное магнитное поле у края ячейки равно 16000 Э и уменьшается в радиальных направлениях как $1/R$.

Ток через ячейку представляет собой импульс длительностью $10^{-7} \dots 10^{-9}$ с [2,3], длительность его переднего (увеличение тока) фронта, например, для

Mo и Cu составляет $(3 \dots 5) \cdot 10^{-9}$ с [2] и задний (погасание ячейки) фронт – такого же порядка. Во время их прохождения в результате изменения собственного магнитного поля ячейки в её окрестностях наводятся электрические поля, величина которых в месте контакта с поверхностью металлического катода может достигать $> 3,5 \cdot 10^7$ В/см [4]. Таким образом, вокруг ячейки у поверхности катода при увеличении и спаде тока возникают скрещённые $E \times H$ -поля, которые убывают с увеличением расстояния от центра ячейки как $1/R$.

При увеличении тока индуцированное электрическое поле $E_{\text{и}}$ направлено противоположно основному E_0 (рис.1). Под его воздействием электроны от плазменного факела движутся в направлении катода по периметру ячейки, образуя токи $I_{\text{Г}}$, которые можно назвать гало-токами по аналогии с гало-токами, возникающими в плазме Токамака при прохождении по ней импульсов разрядного тока и направленными противоположно ему [11].

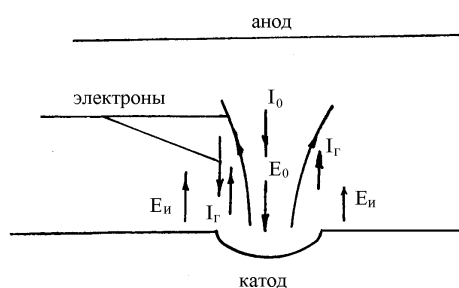


Рис. 1. Схема ячейки при возрастании тока

Одновременно это же индуцированное электрическое поле направляет ионы от катода в сторону анода, что, вероятно, является одним из механизмов их ускорения. Таким образом, во время прохождения переднего фронта тока через ячейку появляются потоки обратных электронов на катод по контуру ячейки в виде гало-тока и там же происходит ускорение ионов в сторону анода. Поэтому суммарный ток ячейки $I_{\text{я}} = I_0 - I_{\text{Г}}$, и он же создаёт в окрестностях ячейки магнитное поле $H_{\text{я}}$.

При уменьшении тока через ячейку (на заднем фронте импульса) индуцированное электрическое поле $E_{\text{и}}$ совпадает по направлению с основным E_0 , направление гало-токов $I_{\text{Г}}$ совпадает с направлением основного тока I_0 , т.е. $I_{\text{я}} = I_0 + I_{\text{Г}}$. При этом $E_{\text{и}}$ ускоряет ионы в сторону катода, дополнительно разогревая окрестности ячейки и способствуя созданию новых ячеек [2].

Рассматриваемая далее модель поведения КП относится именно к этой фазе тока через ячейку.

Индуцированное электрическое поле $E_{\text{и}}$ вызывает в окрестностях ячейки автоэмиссию электронов с поверхности катода. Эти электроны попадают в область $E \times H$ -полей, движутся к центру ячейки по циклоидам, высота которых определяется по формуле $h = 2mc^2 E / eH^2$ [12], создавая поверхностную плазму вследствие десорбции газов (рис.2). Удержанию электронов у катода также способствует магнитное поле $H_{\text{к}}$ тока $I_{\text{к}}$, протекающего в поверхностной зоне катода,

совпадающее по направлению с полем тока ячейки $H_{я}$ и также возрастающее по направлению к ячейке. По мере приближения электронов к ячейке высота их циклоид уменьшается, а их концентрация увеличивается.

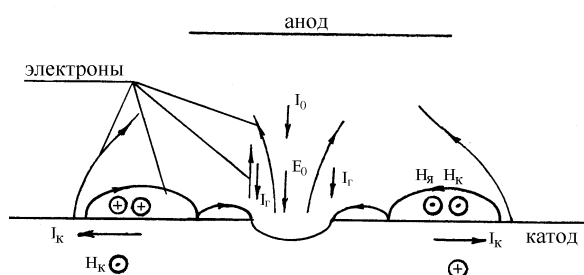


Рис. 2. Схема ячейки при снижении тока

При низком вакууме и загрязнённой поверхности катода поверхностная плазма образуется при относительно небольших электрических полях, т.е. на относительно больших расстояниях от ячейки. Присутствие атомов кислорода на поверхности металла снижает работу выхода электронов. При наличии плёнки окислов толщиной $10...30 \text{ \AA}$ происходит прямое туннелирование электронов из металла в вакуум, что облегчает образование плазмы. При толщине $30...50 \text{ \AA}$ вероятность пробоя диэлектрического конденсатора (т.е. образования ячейки) велика, так как туннельная эмиссия электронов ослаблена, а условия его зарядки хорошие [13]. В таких условиях поверхностная плазма (ореол) может создаваться на расстояниях от ячейки до нескольких сотен микрометров. Наличие большого количества сорбированных газов, микроострий и тонких диэлектрических плёнок способствует возникновению новых ячеек в пределах относительно большого плазменного ореола. Поэтому скорость существующих в таких условиях КП 1-го типа высокая.

В высоком вакууме и при очищенной поверхности катода образование достаточно плотной поверхностной плазмы затруднено, поскольку сорбированных газов мало, а диэлектрические плёнки отсутствуют. Электроны, образовавшиеся в результате автоэмиссии, движутся к ячейке, и по мере приближения их плотность растёт. Одновременно растёт величина наведенного электрического поля, что ещё более увеличивает автоэмиссию электронов. Этим объясняется тот факт, что концентрация плазмы вне КП падает в пространстве, как $1/R^2$, где R – расстояние от центра пятна [14].

Концентрация плазмы в непосредственной близости от ячейки может достигать $> 10^{26} \text{ м}^{-3}$ [2,4], и индуцированного электрического поля $3,5 \cdot 10^7 \text{ В/см}$ [4] достаточно для обеспечения взрывной эмиссии и образования новой ячейки на чистом металле у края предыдущей, что и происходит. Этому также способствует ускорение ионов в сторону катода, производимое индуцированным электрическим полем E_i , и интенсивный разогрев

ими катода в окрестностях ячейки [2]. Вследствие образования новых ячеек в непосредственной близости от прежних скорость движения КП 2-го типа, существующих именно в таких условиях, значительно ниже, чем у пятен 1-го типа.

Эти процессы происходят в прикатодной области (10^{-3} см [3]). Выше этой области согласно закону Ампера токи отдельных ячеек взаимно притягиваются, что, вероятно, приводит к тому, что ячейки группируются в одно КП. Располагающиеся по периметру КП ячейки взаимодействуют с поверхностью катода, как упоминалось выше, их электроны образуют вокруг КП поверхностную плазму, ореол, диаметр которого значительно превышает размеры КП и в пределах которого возникают новые ячейки [4,5]. Условия возникновения новых ячеек внутри пятна значительно хуже, чем вне его, так как там отсутствуют сорбированные газы, а плотности паров недостаточно для образования плазмы, необходимой для пробоя. Поэтому КП 1-го и 2-го типов непрерывно перемещаются в направлениях, где условия возникновения ячеек более благоприятны. В случаях, когда материал катода обладает высоким упругим давлением паров при высоких температурах, например, алюминий, цинк, серебро, давление паров в пятне становится достаточным для создания плазмы, необходимой для пробоя и возникновения новых ячеек в пределах КП. В таких случаях образуются малоподвижные КП 3-го типа с большим количеством капель в плазменных струях [7].

По периметру КП существует магнитное поле $H_{я}$ от наружных ячеек, которое по сути определяется материалом катода (т.е. пороговыми токами), и магнитное поле $H_{к}$, созданное токами, текущими у поверхности катода. С увеличением тока через КП количество ячеек в нём увеличивается, увеличивается его диаметр. Поле $H_{я}$ при этом не изменяется, а поле $H_{к}$ увеличивается пропорционально току через КП. Можно предположить, что когда $H_{к} > H_{я}$, КП делится на отдельные фрагменты. На эту мысль наводит то, что токи, при которых делится КП, минимальны на тонкоплёночных катодах, когда практически весь ток разряда участвует в создании поля $H_{к}$, увеличиваются с увеличением толщины плёнки (когда снижается доля приповерхностных токов) и достигают нескольких десятков ампер на массивных катодах, когда доля приповерхностных токов минимальна. При этом помним, что основной причиной деления пятен на тонкоплёночных катодах является испарение самой плёнки [1].

Рассмотрим примеры движения КП, для удобства, состоящего из одной ячейки.

На протяжённом катоде при подключении источника тока к одному из его концов ток разряда $I_{к}$ течёт к месту подключения, его магнитное поле $H_{к}$ в этом направлении не ослабевает, электроны удерживаются в прикатодной области на большем расстоянии от ячейки, создавая условия для возникновения новых ячеек (рис.3). С противоположной стороны КП из-за отсутствия

поля H_K плотность и распространение поверхностной плазмы меньше, и с этой стороны вероятность возникновения новых ячеек существенно снижается. Поэтому КП в вакууме всегда движется по катоду в сторону токоподвода.

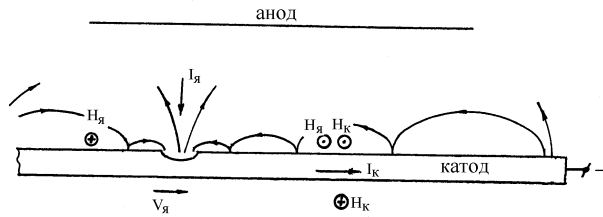


Рис. 3. Схема ячейки при снижении тока на длинном катоде

При наличии внешнего тангенциального магнитного поля оно складывается в антиамперовом направлении с $H_я$ и H_K . С этой стороны создается более плотная и протяжённая поверхностная плазма и лучшие условия для возникновения новых ячеек (рис.4). С противоположной стороны пятна внешнее поле направлено противоположно $H_я$ и H_K , суммарное магнитное поле ослаблено, плотность плазмы ниже, и вероятность возникновения новых ячеек меньше. Поэтому КП движутся в сторону, противоположную правилу Ампера, и, видимо, этим можно объяснить принцип максимума магнитного поля, сформулированный И.Г. Кесаевым [1].

Можно сказать, что направление движения КП связано с появлением дополнительного количества электронов, замагниченных и удержанных у катода внешним тангенциальным магнитным полем со стороны обратного движения, что увеличивает концентрацию электронов, достигающих ячейки. На расстояниях от ячейки, где магнитное поле $H_я + H_K < H_B$, дополнительная плазма образуется даже при очень малых внешних магнитных полях, поэтому КП столь чувствительно к ним.

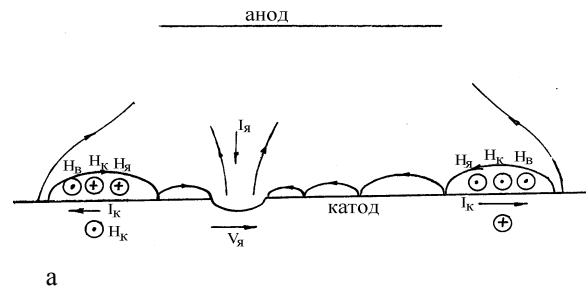
Вероятно, с этим связано утверждение И.Г. Кесаева о том, что “величина эффективного радиуса взаимодействия катодного пятна с магнитным полем по какой-то причине оказалась превосходящей в несколько раз размеры самого пятна” [1].

Если десорбированных электронами газов мало, в окрестностях ячейки образуется плазма малой плотности, практически незаметная. Когда поток электронов достигает места, где возможно выделение газов, паров или имеются тонкие диэлектрические плёнки, плотность плазмы возрастает, возникает новая ячейка. Зигзагообразное движение КП [5], по-видимому, можно объяснить перемещением КП вдоль границ зёрен на металлическом поликристаллическом катоде, на которых больше всего сорбируется газов, а также возможна меньшая работа выхода электронов.

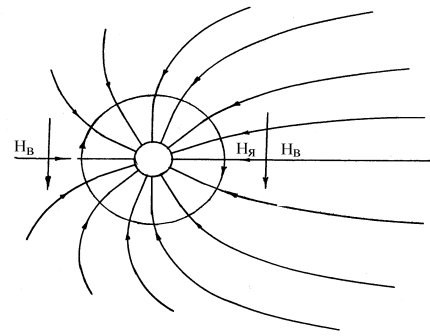
Магнитные поля величиной 1...2 Тл сравнимы с собственными полями у ячейки. При таких внешних магнитных полях указанная модель разрушается, и КП подчиняется закону Ампера [10].

Если внешнее магнитное поле направлено к катоду под углом (рис. 5), то ток от КП I_1 направлен

вдоль магнитных силовых линий, и его магнитное поле со стороны острого угла складывается с



а



б

Рис. 4. Схема ячейки при снижении тока в присутствии внешнего тангенциального магнитного поля: а – вид сбоку; б – вид сверху

магнитными полями тока ячейки и катода, удерживая электроны у поверхности катода, повышая плотность поверхностной плазмы, и, таким образом, вероятность возникновения новых ячеек. Поэтому КП, двигаясь в «антиамперовом» направлении под действием тангенциальной составляющей внешнего магнитного поля, смещается в сторону острого угла между ним и катодом, образуя так называемый угол Робсона [16].

Если внешнее магнитное поле имеет градиент составляющей, нормальной к поверхности катода, КП смещается в сторону, противоположную направлению этого градиента [17]. Это явление можно объяснить следующим образом. Электроны, эмитированные с поверхности катода (в пределах ореола), замагничиваются этим нормальным магнитным полем, и часть из них уходит к аноду, не достигнув ячейки. Со стороны ячейки, где нормальная составляющая поля больше, количество таких электронов больше, чем с противоположной стороны, где это поле меньше.

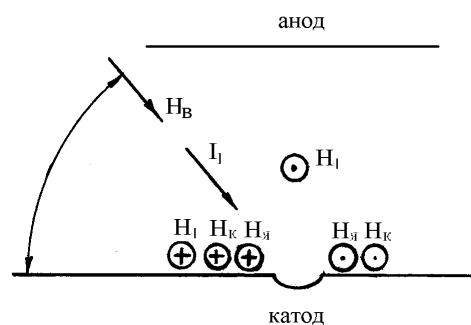


Рис. 5. Схема смещения ячейки в сторону острого угла при наклонном внешнем магнитном поле

Поэтому плотность электронов в окрестностях ячейки вдоль направления, противоположного градиенту нормальной составляющей, больше и соответственно больше вероятность появления новых ячеек.

3. ВЫВОДЫ

С помощью электронно-магнитной модели КП, с учётом ряда упрощений качественно можно объяснить ряд его особенностей, в том числе появление слабого свечения (ореола) вокруг КП, диаметр которого в несколько раз превышает диаметр самого КП, увеличенный радиус взаимодействия КП с магнитным полем по сравнению с размерами КП, существование КП 1 и 2 типов, их деление. Эта модель объясняет обратное движение КП в тангенциальном магнитном поле и переход к прямому в сильных магнитных полях. Также можно обосновать увеличение скорости перемещения КП при увеличении тока через него, движение КП к токоподводу на катоде, его смещение в сторону острого угла между поверхностью катода и внешним магнитным полем и движение в направлении, противоположном градиенту составляющей этого поля, нормальной к катоду. Модель может быть полезной при модернизации существующих вакуумно-дуговых испарителей и создании новых.

Автор выражает благодарность В.С. Войцене за полезные советы при обсуждении статьи и внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.Г. Кесаев. *Катодные процессы электрической дуги*. М.: «Наука», 1968, 244 с.
2. В. Juttner, V.F. Puchkarev, E. Hantzsche, I. Beiliis. Cathode Spots // *Handbook of Vacuum Arc Science and Technology*, R.L. Voxman, P. Martin, D. Sandersrs (editors), Noyes Publications (Park Ridge, NJ) 1995, с. 73 – 281.
3. Г.А. Месяц. *Эктон.*, Ч.1 и 2. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993 – 1994.
4. А.М. Зимин, В.А. Иванов, Б. Ютнер. Динамика катодных пятен на поверхности бериллия в дуговом вакуумном разряде // *Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез*, 2001, вып. 2, с. 44 – 50.
5. В. Juttner and I. Kleberg. The Retrograde Motion of Arc Cathode Spots in Vacuum // *J.Phys. D: Appl.Phys.* 33(2000)2025 – 2036. Printed in the UK.
6. P. Siemroth, T.H. Schulke, T.H. Witke, B. Schultrich. Short-time Investigation of Laser and Arc Assisted Deposition Process // *Thin Films*. Edited E. Heht, F. Richter, J. Hahn, 1994, DGM Informationgesellschaft mbH, Verlag.
7. Н.М. Зыкова, В.В. Канцель, В.И. Раховский и др. Динамика развития катодной и анодной областей электрической дуги // *ЖТФ*. 1970, № 11, с. 2361 – 2367.
8. L.P. Sablev, A.A. Andreev, V.V. Kunchenko, S.N. Grigoriev. Vacuum-Arc Evaporator of Metals with an Extended Planar Cathode // *Proc. Of the TATF'98*, Germany, Regensburg , 1998, h. 323 – 326.
9. S.K. Sethuraman and M.R. Barrault. Study of the Motion of Vacuum Arcs in High Magnetic Field // *Journal of Nuclear Materials* 1980. V.93-94, p.791 – 798
10. M. G. Drouet. The Physics of the Retrograde Motion of the Electric Arc. // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1981. V.20, No 6, p.1027 – 1036.
11. G. Martin. Halo Currents in a Circular Tokamak: Measurements on TORE-SUPRA. // 26th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Maastricht, 1999, ECA, vol.231 (1999), p.969 – 972.
12. Л.А. Арцимович. *Элементарная физика плазмы*. М.: Атомиздат, 1966,
13. Я.Ф. Волков, Е.Д. Волков, Ю.А. Грибанов и др. Особенности дугообразования на лимитере с диэлектрической плёнкой в токовом разряде // *ВАИТ. Серия Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*. 1981. Вып.5(19), с.91–95.
14. V.A. Ivanov, B. Juttner, H. Pursh. Time-resolved measurements of the parameters of arc cathode plasmas in vacuum. // *IEEE Trans.Plasma . Sci.* PS-13, 1985, p.334 – 336.
15. Г.А. Месяц, С.А. Баренгольц. Механизм генерации аномальных ионов вакуумной дуги // *Успехи физических наук* 2002, том 172, № 10, с. 1113 – 1130.
16. С.А. Баренгольц, Е.А. Литвинов, Е.Ю. Садовская, Д.Л. Шмелёв. Движение катодного пятна вакуумной дуги в магнитном поле. // *ЖТФ*. 1998, т. 68, № 6, с. 60 – 64.
17. И.И. Аксёнов, А.А. Андреев. О движении катодного пятна вакуумной дуги в неоднородном магнитном поле // *Письма в ЖТФ*, 1977, т.3, вып. 23, с. 1272 – 1275.