

Вакуумно-дуговой разряд на интегрально-холодном катоде

А. А. Лисенков¹, В. Т. Барченко², В. Д. Гончаров², А. С. Жеухин²

¹ Институт проблем машиноведения РАН

199178 Россия, Санкт-Петербург

e-mail: ind@director.ipme.ru

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет имени В.И. Ульянова (Ленина)

197376 Россия, Санкт-Петербург

e-mail: vtbarchenko@yandex.ru

Описан вакуумно-дуговой источник плазмы протяженной конструкции, формирующий направленный ленточный поток плазмы, работающий в импульсно-периодическом режиме, который позволил получить дополнительную информацию о развитии вакуумно-дугового разряда. Представлены методы изучения катодных пятен. Обнаружена зависимость скорости перемещения катодных пятен от времени горения разряда.

Введение

Вакуумно-дуговой разряд – это самостоятельный разряд, развивающийся в парах материала катода. Эмиссионным центром разряда является катодное пятно, характеризующееся малыми размерами $10^{-6} \dots 10^{-3}$ м, в котором за очень короткое время температура достигает температуры кипения, что и обуславливает интенсивное испарение материала катода, обеспечивающее высокую эффективность генерационных процессов в разряде [1] – [3].

Катодное пятно включает в себя эмитирующий участок катода, и прилегающий к нему бесстолкновительный слой пространственного заряда, в котором локализуется катодное падение напряжения и обеспечивается передача энергии ионам. Величина этой энергии должна быть достаточна для разогрева катода до температуры, обеспечивающей необходимое распределение по энергиям свободных электронов в теле катода, и воспроизводства необходимого количества испаряемого материала.

Горение разряда невозможно при температуре в катодном пятне ниже некоторой критической, определяемой теплофизическими свойствами материала катода и электрическими параметрами схемы: $U_{\text{ист.пит}} > U_{\text{к}}$, $I_{\text{ист.пит}} > I_{\text{min крит}}$. Уровень мощности, выделяющейся на катоде, определяется катодным падением напряжения, близким по значению к потенциалу ионизации металла, и величиной разрядного тока. Движение катодных пятен обуславливается самопроизвольным отмиранием одних ячеек и образованием других [4].

Результатом воздействия мощных источников тепла на поверхность катода являются сложные физико-химические процессы, приводящие к изменению структурного и фазового состава поверхностного слоя. Данные изменения способны оказать влияние, как на скорость перемещения катодных пятен, так и на процессы в плазме дугового разряда. Однако изменение скорости перемещения катодных пятен связывают с величиной разрядного тока и создаваемым, в связи с этим магнитным полем, не учитывая при этом степень разогрева катода.

Следует также отметить, что вакуумно-дуговой разряд с интегрально-холодным катодом существует на рабочей поверхности катода лишь до тех пор, пока его температуры недостаточно для протекания тока за счет термоэлектронной эмиссии. При выполнении этих условий данный тип разряда переходит в дуговой разряд с диффузной привязкой на катоде [5]. Поэтому, вакуумно-дуговой разряд с интегрально-холодным катодом, следует рассматривать с точки зрения переходного этапа в развитии дугового разряда с горячим катодом, и следует говорить именно о динамике развития катодных пятен во времени, по мере разогрева катода.

Описание экспериментальной установки

Для изучения катодных пятен использовалось вакуумно-дуговое устройство протяженной конструкции (рис. 1), работающее в импульсном режиме и формирующее направ-

ленный ленточный поток плазмы [6]. Внешнее магнитное поле, создаваемое соленоидом 1, обеспечивает продольное перемещение катодного пятна *б* по практически прямолинейной траектории по рабочей поверхности протяженного цилиндрического катода 2 от поджигающего электрода 5 в сторону токового ввода 3 до дугогасящего экрана 4. Частота следования токовых импульсов определяется временем жизни катодных пятен на рабочей поверхности.

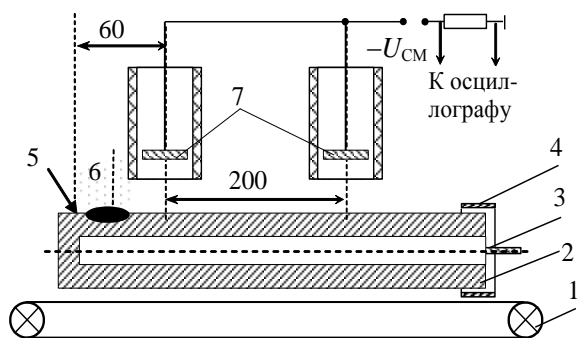


Рис. 1. Вакуумно-дуговой источник плазмы протяженной конструкции: 1 – магнитная система; 2 – катод; 3 – токовый ввод; 4 – дугогасящий экран; 5 – обрабатываемое изделие; 5 – поджигающий электрод; 6 – катодное пятно; 7 – зонды

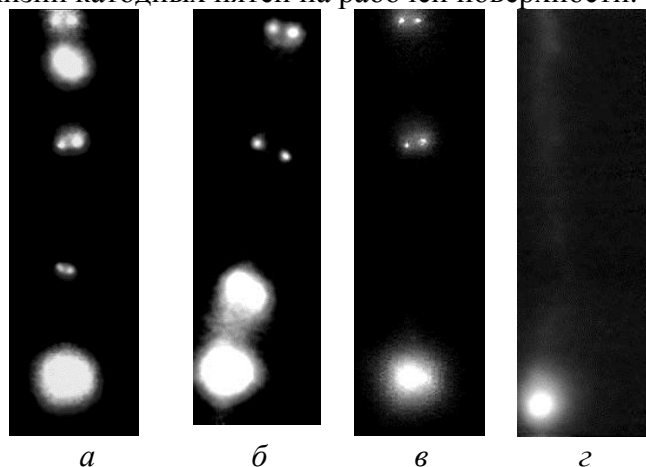


Рис. 2. Перемещение катодных пятен по рабочей поверхности протяженного катода при изменении рабочей температуры катода

В процессе работы было установлено, что при токе разряда 200 А максимальное время τ существования катодных пятен на рабочей поверхности водоохлаждаемого циркониевого катода длиной 0.4 м и диаметром 0.06 м, превышало 100 мс. При этом сокращение длительности токовых импульсов, было связано с увеличением рабочей температуры катода.

Учитывая, что первые токовые импульсы имеют большую длительность, для регистрации перемещения катодных пятен по рабочей поверхности катода использовалась видеокамера формата VHS. Стандарты телевидения имеют чересстрочную развертку: в одной секунде 25 кадров и 50 полей (полукадров) с четными и нечетными строками. В компьютерном мониторе развертка построчная и в одну секунду отображается 25 полных кадров. При обработке видеоряда с аналоговой видеокамеры компьютер преобразует каждые два поля в один кадр. Поэтому на компьютерном мониторе каждый кадр отображается с двумя зафиксированными моментами наблюдаемого движения: первый момент соответствует нечетному полю, а второй – четному.

Перемещение катодных пятен также исследовалось с помощью зондов 7 (рис. 1), расположенных по высоте катода, от поджигающего электрода до дугогасящего экрана. Конструкция зондов и их расположение обеспечивало регистрацию максимума ионной составляющей плазменного потока на экране осциллографа при условии совпадения перемещающихся катодных пятен с осью приемной поверхности зондов.

Результаты исследований

В процессе исследований было выделено два типа разрядов, характеризующихся различными условиями существования: дуговой разряд на диэлектрических пленках загрязнений, возникающий в первоначальный момент времени, и дуговой разряд с материала катода.

При первом включении на неочищенной поверхности катода возникает разряд с хаотично перемещающимися и охватывающими всю поверхность катода и экранов катодными пятнами. Данный тип разряда способен существовать при более низких значениях разрядного тока, чем разряд на очищенной от диэлектрических пленок поверхности катода. Разрядный ток определяет количество одновременно существующих пятен на рабочей поверхности катода. На окисных пленках ток, замыкающийся на каждое катодное пятно, имеет порядок всего лишь несколько ампер, отчего и наблюдается увеличение количества одновременно существующих пятен.

Появление на рабочей поверхности катода высокоскоростных и неуправляемых светящихся образований связано со скользящим разрядом, образующимся в результате частичного осаждения положительно заряженных частиц на поверхности загрязнений, и формированием двойных электрических слоев с высокой напряженностью электрического поля. Пробой подобного слоя хотя бы в одной точке инициирует лавину подобных пробоев. В результате на рабочей поверхности катода, в зонах загрязнений, появляются неуправляемые высокоскоростные поверхностные разряды, удаляющие диэлектрические пленки, но не вызывающие глубоких эрозионных процессов на поверхности катода.

После очистки рабочей поверхности, характер движения катодных пятен по поверхности катода и их количество кардинальным образом меняется.

При движении катодное пятно во все последующие моменты времени, всегда перемещается на менее прогретый участок катода, поэтому его скорость определяется уровнем подводимой мощности и временем достижения в катодной ячейке рабочей температуры испарения. Время, затрачиваемое на разогрев поверхности, зависит от начальной температуры в точке нахождения катодного пятна. При этом следует учитывать, что при фазовом переходе металла из твердого состояния в жидкое, изменяется коэффициент теплопроводности. Для непрерывно перемещающегося по рабочей поверхности эмиссионного центра, возникновение пятна на новом месте обеспечивается горящим пятном и накладывающимися внешними факторами. Здесь следует особо подчеркнуть, что при движении катодного пятна следует рассматривать следующие процессы:

- эмиссию электронов из существующего пятна;
- формирование в токовом канале в плазме, со стороны максимума индукции магнитного поля, избыточного числа заряженных частиц;
- разогрев нового участка поверхности катода, (при этом существенны процессы, связанные с изменением размеров катодного пятна);
- уменьшение мощности подводимой к гибнущему пятну и его остывание;
- выравнивание температур в катодных пятнах;
- переход катодного пятна на подготовленный участок.

Если при просмотре кадров рассматривать только те кадры, на которых начало совпадает с возникающим токовым импульсом, то последовательно следующие друг за другом кадры дают представление о характере перемещения пятен [7]. В результате обработки видеоматериала была получена покадровая развертка изображения, позволяющая наблюдать трансформацию катодных пятен во времени и оценить скорость их перемещения по рабочей поверхности катода с временным разрешением 20 мс, которое определяется временем отображения одного полукадра. Съемка осуществлялась при фиксированных величинах тока разряда и внешнего магнитного поля.

На рис. 2 представлена картина, показывающая изменение характера перемещения катодных пятен по рабочей поверхности при увеличении рабочей температуры катода. Первый токовый импульс длительностью $\tau = 80$ мс, зафиксированный на холодном катоде, соответствует трем кадрам видеоряда (рис. 2.а). Групповое катодное пятно, наблюдаемое внизу кадра, связано с его остановкой у дугогасящего экрана.

Непрерывное перемещение катодных пятен по ограниченной рабочей поверхности катода, приводит к установлению на ней некоторой средней равновесной температуры, определяемой диаметром и длиной катода, а также условиями его охлаждения.

По мере повышения температуры катода количество фиксируемых моментов движения катодных пятен за один импульс сокращается. Рис. 2.б сложен из двух кадров и имеет три момента движения ($\tau = 60$ мс). При этом наблюдалось, что в процессе движения изменяются геометрические размеры пятен. Рис. 2.в состоит из двух моментов движения ($\tau = 40$ мс), а рис. 2.г соответствует одному кадру и одному моменту движения ($\tau = 20$ мс), при этом отчетливо видно тепловое время послесвечения, оставляемое катодным пятном.

Перемещение катодных пятен также исследовалось с помощью зондов. Конструкция зондов и их расположение обеспечивало регистрацию максимума ионной составляющей плазменного потока на экране осциллографа при условии совпадения перемещающихся ка-

тодных пятен с осью приемной поверхности электрических зондов. На рис. 3 представлены осциллограммы токовых импульсов в зависимости от температуры циркониевого катода.

Наблюдаемое на всех фотографиях плавное нарастание тока на отрезке от поджигающего электрода до первого зонда характеризуется перемещением катодных пятен на начальном участке и связаны с прогревом катода. С ростом температуры катода шумовые составляющие сигнала на осциллограммах уменьшаются, а направленная скорость перемещения катодных пятен по рабочей поверхности в сторону токового ввода увеличивается.

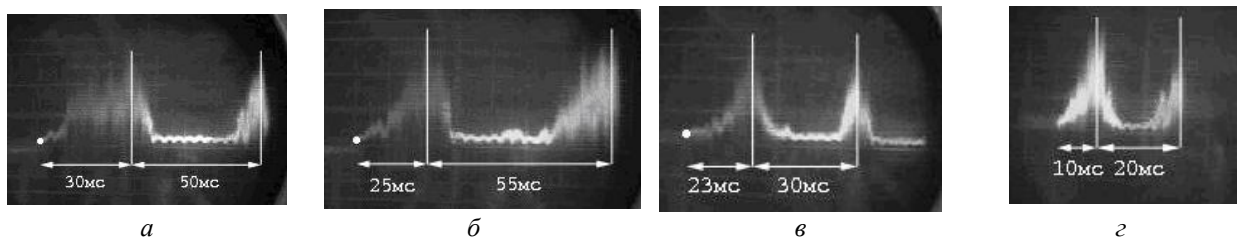


Рис. 3. Осциллограммы, характеризующие перемещение катодных пятен по рабочей поверхности, с изменением температуры катода

Катодное пятно смещается в сторону максимума индукции магнитного поля $\Sigma \vec{B}_{\max} = \vec{B}_{\text{пл}} + \vec{B}_{\text{кат}}$ [8], со стороны токового ввода, создаваемого токовым каналом плазменного потока $I_{\text{пл}}$ и током, протекающим по телу катода $I_{\text{кат}}$ (рис. 4.а).

На элементарную частицу, находящуюся в плазменном потоке действует сила Лоренца и сила электрического поля: $\vec{F}_r = e[\vec{V}_z \times \vec{B}]$, $\vec{F}_z = e[\vec{V}_r \times \vec{B}]$, $\vec{F}_E = e\vec{E}$.

Для расчета траектории движения электронов, выходящих из катодного пятна, используем следующие выражения:

$$a_z = \frac{\vec{F}_z}{m_e} + \frac{\vec{F}_E}{m_e} = \frac{e[\vec{V}_r \times \vec{B}]}{m_e} + \frac{e\vec{E}_E}{m_e}, \quad a_r = -\frac{\vec{F}_r}{m_e} = -\frac{e[\vec{V}_z \times \vec{B}]}{m_e},$$

$$\vec{V}_z = \vec{V}_{0z} + a_z \Delta t, \quad \vec{V}_r = \vec{V}_{0r} + a_r \Delta t,$$

$$z = z_0 + \vec{V}_z \Delta t, \quad y = y_0 + \vec{V}_y \Delta t,$$

m_e – масса заряженной частицы (электрона); \vec{F}_l – проекция силы Лоренца на оси z и r ; \vec{V} – проекция скорости движения заряженной частицы на оси z и r ; \vec{V}_0 – проекция скорости движения заряженной частицы на оси z и r в предыдущий момент времени; a – ускорение заряженной частицы по оси z и r ; Δt – шаг по времени; z – положение заряженной частицы на оси z ; z_0 – проекция положения заряженной частицы на ось z в предыдущий момент времени; y_0 – положение заряженной частицы на оси r ; r_0 – проекция положения заряженной частицы на ось r , в предыдущий момент времени.

Результаты расчета, характеризующие условия существования катодных пятен на рабочей поверхности, представлены на рис. 4.б и 4.в. При перемещении катодного пятна наблюдается трансформация его размеров, изменяющая условия эмиссии электронов.

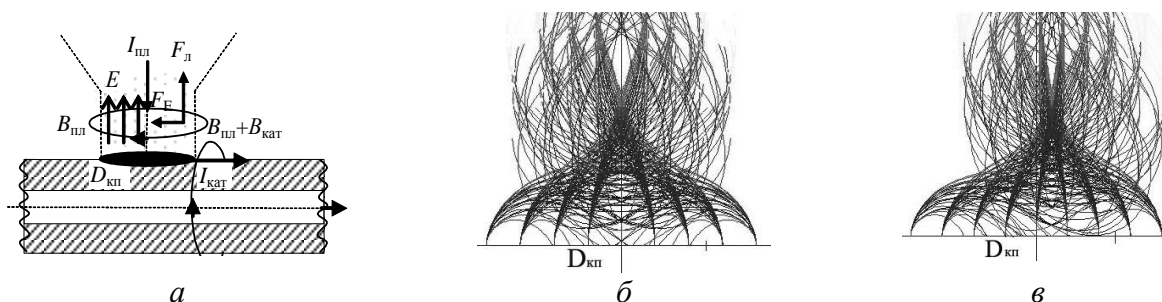


Рис. 4. Моделирование движения электронов из области катодного пятна: а – математическая модель расчета с учетом силы Лоренца; расчет траекторий движения электронов из катодного пятна без учета (б) и с учетом (в) тока, протекающего по катоду

Катод, в области катодных пятен подвержен интенсивному разрушению. Количество ионов, образующихся в зоне ионизации и являющихся основным источником энергии в пятне, не может быть больше количества испаренных атомов, а изменение размеров катодного пятна приводит к изменению степени ионизации плазменного потока. В свою очередь, при малых размерах катодного пятна, максимальный уровень температуры достигается за более короткий промежуток времени, чем в пятнах, более крупного размера. Кроме этого, уменьшение размеров катодного пятна и изменение плотности ионного тока оказывает влияние на напряженность электрического поля. Таким образом, температура и размеры катодного пятна являются регулятором, управляющим испарением атомов, и отвечают за условия поддержания разряда.

Мощность, подводимая непосредственно к испаряющейся поверхности, затрачивается на нагрев катода в катодном пятне до температуры, необходимой для воспроизводства необходимого количества испаряемого материала в единицу времени. Время, затрачиваемое на разогрев катода до необходимой температуры, определяется исходной температурой катода и мощностью подводимой из разряда. Таким образом, скорость перемещения катодных пятен будет определяться уровнем температуры в них и током разряда.

Катодное пятно, как тепловой источник воздействия на поверхность катода, моделируется в форме круга радиусом R (рис. 5), в пределах которого тепловой поток, подводимый из разряда и взаимодействующий с поверхностью, постоянен для любого момента времени $-\lambda(dT/dh)_{h=0} = q$, ($0 \leq r \leq R$), а вне него – равен нулю. Катод, по отношению к эффективному размеру источника тепла, является полубесконечным телом, поэтому на бесконечном удалении от поверхности тепловой поток равен нулю, а температура постоянна $(dT/dh)_{h=0} = 0$, ($-\infty \leq r \leq -R$ и $R \leq r \leq \infty$) ($-R \leq r \leq R$); $(dT/dh)_{h=\infty} = 0$; $T_{h=\infty} = T_0$. В исходном состоянии температура поверхности катода одинакова во всех точках $T_{t=0} = T_0$.

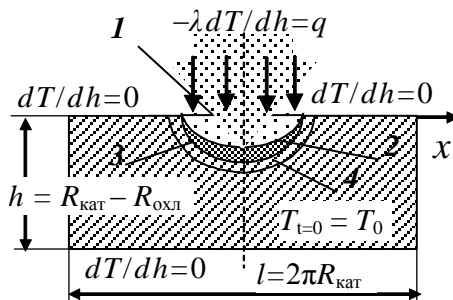


Рис. 5. Модель воздействия теплового потока на поверхность: 1 – начальное положение катодного пятна на поверхности; 2 – нижняя граница при кипении; 3 – нижняя граница жидкой фазы; 4 – граница прогрева катода до температуры эмиссии

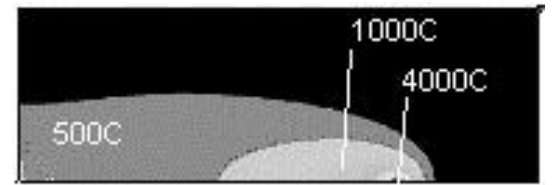


Рис 6. Расчетные изотермы на поверхности катода, при перемещении теплового источника постоянного воздействия диаметром $5 \cdot 10^{-6}$ м и при скорости движения 10 м/с

Для расчета поля температур при воздействии теплового источника использовалось следующее соотношение:

$$T(h,t) = \frac{2q\sqrt{at}}{\lambda} \left(\text{ierfc}(h/2\sqrt{at}) - \text{ierfc}(\sqrt{h^2 + R^2}/2\sqrt{at}) \right), \quad \text{ierfc}(x) = \frac{\exp(-x^2)}{\sqrt{\pi}} - x \text{erfc}(x),$$

где h – глубина прогрева; $a = \lambda/\rho c$ – коэффициент температуропроводности; ierfc – интегральная форма функции ошибок Гаусса.

При перемещении катодного пятна по рабочей поверхности за ним остаются области, в виде вытянутых изотерм, с высокой температурой (рис. 6 и 2.2).

Для разработки самосогласованной математической модели адекватно описывающей протекание процесса в рассматриваемом вакуумном дуговом разряде необходимо учитывать, взаимосвязь процессов протекающих в плазме разряда с процессами, определяющими температуру в катодном пятне и среднюю температуру катода. До настоящего времени четко сложившихся представлений о подобной взаимосвязи этих процессов не существует. Об этом косвенно свидетельствует большое количество видов эмиссии электронов из катодного

пятна, привлекаемое для объяснения наблюдаемых больших значений плотности тока в катодном пятне.

В этом случае необходимо использовать систему уравнений, состоящую из уравнения для напряженности электрического поля у поверхности катода, зависящую от пространственного распределения заряженных частиц и геометрических размеров катодного пятна, т.к. изменение размеров пятна приводит к изменению напряженности, плотности эмиссионного и ионного токов, баланса энергии в зоне генерации, баланса тепла на поверхности катода и уравнений для определения температуры катода.

В рассматриваемой модели могут быть заданы лишь разрядный ток $I_{\text{разр}}$ и исходные физические константы, характеризующие материал катода. Неизвестными остаются: катодное падение напряжения $U_{\text{кат}}$, размер катодного пятна $D_{\text{кат}}$, плотность тока j , доля электронного тока I_e , степень ионизации плазмы α , концентрация частиц плазмы n_e и электрическое поле у поверхности катода E , температура в катодном пятне $T_{\text{кат}}$ и катода $T_{\text{кат}}$.

Изменение размеров пятна приводит к изменению напряженности, плотности эмиссионного и ионного токов, баланса энергии в зоне генерации, баланса тепла на поверхности катода и уравнений для определения температуры катода, при этом все выше перечисленное влечет за собой изменение параметров генерируемого плазменного потока.

Электрическое поле у поверхности твердого тела может быть образовано не только за счет внешней разности потенциалов, но также за счет поля положительно заряженных ионов, находящихся у поверхности катода. Подобный слой ионов формируется при испарении автоэмиссионного катода при его разогреве собственно автоэмиссионным током. Последующая ионизация испарившихся атомов приводит к созданию у поверхности катода слоя плотной неравновесной плазмы. Сильное электрическое поле в пограничной области вызывает дополнительное усиление автоэлектронной эмиссии. Этот процесс перехода от обычной автоэлектронной эмиссии к более высоким плотностям эмиссионного тока приводит к формированию в разрядном промежутке вакуумной дуги.

Таким образом, плотность эмиссионного тока и тип существующей эмиссии определяется температурой в катодном пятне $T_{\text{кат}}$ и напряженностью электрического поля E , создаваемой у поверхности катода: $j_e = f(T_{\text{кат}}, E)$.

В свою очередь, напряженность электрического поля $E = f(U_k, r_{\text{кат}}, j_i / j_e)$, где U_k – падение потенциала в области пространственного заряда; $r_{\text{кат}}$ – радиус катодного пятна; j_i / j_e – соотношения плотностей ионного и электронного токов, и определяется уравнением Маккоуна.

Выводы

В течение нескольких первых импульсов разрядного тока катодные пятна «привязываются» к диэлектрическим пленкам на поверхности катода, что визуально наблюдается как горение разряда по всей поверхности катода и катодных экранов, и отсутствие влияния внешнего магнитного поля (рис. 1) на характер их движения.

После очистки поверхности катода характер перемещения катодных пятен «упорядочивается» и начинает проявляться их преимущественное перемещение в направлении тока-схема.

Скорость перемещения катодных пятен зависит от времени горения разряда.

Список литературы

- [1] Грановский В. Л. Электрический ток в газе. М.: 1971. С. 99–141.
- [2] Кобайн Дж. Введение в физику вакуумной дуги // Вакуумные дуги. М.: Мир, 1982. С.19–39.
- [3] Эккер Г. Вопросы теории вакуумной дуги // Вакуумные дуги. М.: Мир, 1982. С.269–384.
- [4] Месяц Г. А. Эктоны. Екатеринбург: УИФ Наука, 1993. Ч.2. 244 с.
- [5] Дороднов А. М., Кузнецов А. И. // Письма в ЖТФ. 1979. Т.5. № 16. С.1001–1006.
- [6] Пат. на изобрет. №2180472 Российская Федерация, МКП 7Н05Н1/50, С23С14/35. Вакуумно-дуговой источник плазмы / Ветров Н. З., Лисенков А. А. и др.; опубл. 2002, Бюл. № 7.

[7] Лисенков А. А. Вакуумная техника и технология. 2004. Т. 14. № 4. С. 221–226.

[8] Саксаганский Г. Л. Электрофизические вакуумные насосы. М.: Энергоатомиздат, 1988. 277

с.